



T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

BÜYÜKŞEHİR ULAŞIM KORİDORLARINDA EMİSYON
YÖNETİMİ İÇİN YEREL BİTKİ DOKUSUNA DAYALI BİR
MODEL ÖNERİSİ: D-100 KARAYOLU GÖZTEPE KAVŞAĞI
ÖRNEĞİ

Sezer ÜNAL
205220003

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet TEKTAŞ
II.Danışman Prof. Dr. Necla TEKTAŞ

Bandırma, 2025

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİMEN STİTÜSÜ
AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

BÜYÜKŞEHİR ULAŞIM KORİDORLARINDA EMİSYON
YÖNETİMİ İÇİN YEREL BİTKİ DOKUSUNA DAYALI BİR
MODEL ÖNERİSİ: D-100 KARAYOLU GÖZTEPE KAVŞAĞI
ÖRNEĞİ

Sezer ÜNAL
205220003

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet TEKTAŞ
II.Danışman Prof. Dr. Necla TEKTAŞ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih:
Tezin Savunulduğu Tarih:19.12.2025

Bandırma, 2025

DOKTORA TEZİ ONAYI

Bandırma Onyedli Eylöl Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojileri Programı'nda Doktora öğrencisi Sezer ÜNAL tarafından, Prof. Dr. Mehmet TEKTAŞ danışmanlığında hazırlanan “Büyükşehir Ulaşım Koridorlarında Emisyon Yönetimi İçin Yerel Bitki Dokusuna Dayalı Bir Model Önerisi: D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı Örneği” başlıklı tez, aşağıda isimleri yer alan jüri üyeleri tarafından 19/12/2025 tarihinde yapılan Tez Savunma Sınavında oybirliği ile başarılı bulunmuş ve Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvan Ad-Soyad	İmza
Jüri Başkanı (Tez danışmanı):	Prof. Dr. Mehmet TEKTAŞ	
Jüri Üyeleri :	Doç. Dr. İsmail KOÇAK	
	Dr. Öğretim Üyesi Caner PENSE	
	Prof. Dr. Mehmet ADAK	
	Prof. Dr. Kürşad DEMİREL	

ETİK BEYAN SAYFASI

T.C.

Bandırma Onyedli Eylöl Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu tez çalışmasının özgün olduğunu, hazırlanması sürecinde bilimsel etik kurallara uygun davrandığımı, bana ait olmayan tüm veri, düşünce ve sonuçları kaynak göstererek kullandığımı ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi beyan ederim.

Tezin Adı: "Büyükşehir Ulaşım Koridorlarında Emisyon Yönetimi İçin Yerel Bitki Dokusuna Dayalı Bir Model Önerisi: D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı Örneği"

Adı Soyadı: Sezer ÜNAL

Savunma Tarihi: 19/12/2025

ÖZET

BÜYÜKŞEHİR ULAŞIM KORİDORLARINDA EMİSYON YÖNETİMİ İÇİN YEREL BİTKİ DOKUSUNA DAYALI BİR MODEL ÖNERİSİ: D-100 KARAYOLU GÖZTEPE KAVŞAĞI ÖRNEĞİ

Sezer ÜNAL

Aralık, 2025

Günümüzde kontrolsüz kentleşme ve motorlu taşıt mobilitesi, ulaşım kaynaklı emisyonları (PM_{2.5}, NO_x, CO, CO₂) kentsel ekosistem ve halk sağlığı üzerinde temel bir tehdit unsuru haline getirmiştir. Bu tez çalışması, söz konusu kirleticilerin sönmülmesinde yol kenarı bitkilendirme stratejilerinin etkinliğini, veri temelli ve çok boyutlu bir karar destek modeli çerçevesinde analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın temel özgünlüğü, biyolojik ekosistem servislerini teknik karar mekanizmalarıyla entegre eden disiplinlerarası bir metodoloji sunmasıdır. Araştırma kapsamında, i-Tree Eco tabanlı karbon tutma verileri ve IPCC Tier 1 emisyon envanter protokolü; SWARA, DEMATEL ve Entropy yöntemlerinden oluşan hibrit bir ağırlıklandırma yaklaşımıyla birleştirilmiştir. Geliştirilen bu model aracılığıyla; ağaç, çalı ve yer örtücü formundaki 32 alternatif tür, 12 farklı çevresel ve ekonomik kriter doğrultusunda TOPSIS algoritması ile optimize edilmiştir. İstanbul D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı ekseninde yürütülen saha analizleri sonucunda; *Robinia pseudoacacia*, *Nerium oleander* ve *Hedera helix* türleri en yüksek performans indeksine sahip taksonlar olarak belirlenmiştir. Ayrıca İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa illerinin hava kalitesi verileri üzerinden yapılan projeksiyonlar, önerilen modelin bölgesel uygulanabilirliğini doğrulamıştır. Araştırma bulguları, "çok katmanlı bitkilendirme" stratejilerinin kentsel iklim ve hava kalitesi üzerinde sinerjik bir iyileştirme sağladığını kanıtlamaktadır. Bu çalışma, yeşil altyapı çözümlerinin ulaşım planlama politikalarına entegrasyonu için ölçeklenebilir ve özgün bir metodolojik yol haritası sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), i-Tree Eco, Ulaşım Kaynaklı Emisyonlar, Yeşil Altyapı, Yol Bitkilendirme

ABSTRACT

A MODEL PROPOSAL FOR EMISSION MANAGEMENT IN METROPOLITAN TRANSPORT CORRIDORS BASED ON NATIVE PLANT TEXTURE: A CASE STUDY OF GÖZTEPE JUNCTION, D-100 HIGHWAY

Sezer ÜNAL

December, 2025

Rapid urbanization and the proliferation of fossil fuel-based vehicular mobility have escalated transportation-derived emissions (PM_{2.5}, NO_x, CO, and CO₂) into a critical global threat to urban ecosystems and public health. This doctoral dissertation analyzes the efficacy of roadside afforestation strategies as a "Green Infrastructure" component in mitigating these pollutants through a data-driven, multi-dimensional decision-support framework. The primary originality of this research lies in its interdisciplinary modeling approach, which integrates biological ecosystem services with technical decision-making mechanisms. Within the scope of the study, i-Tree Eco-based carbon sequestration data and IPCC Tier 1 emission inventory protocols were synthesized with a hybrid weighting methodology comprising SWARA, DEMATEL and Entropy methods. Through this developed model, 32 alternative plant species including trees, shrubs, and groundcovers were optimized using the TOPSIS algorithm across 12 distinct environmental, economic, and structural criteria. Field analyses conducted at the Istanbul D-100 Highway Göztepe Junction revealed that *Robinia pseudoacacia*, *Nerium oleander*, and *Hedera helix* exhibited the highest performance indices. Furthermore, projections based on air quality data from Istanbul, Ankara, Izmir, and Bursa validated the regional applicability of the proposed model. The research findings confirm that "multi-layered vegetation" strategies yield a synergistic improvement in urban microclimate and air quality. This study provides a scalable and original methodological roadmap for the integration of green infrastructure solutions into transportation planning and urban design policies.

Keywords: Green Infrastructure, i-Tree Eco, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM), Roadside Vegetation, Transportation Emissions.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tarafından belirlenen akademik standartlar çerçevesinde hazırlanmıştır. Çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak yönlendiren, katkılarıyla bu çalışmanın şekillenmesinde önemli rol oynayan danışmanım Prof. Dr. Mehmet TEKTAŞ ve eş danışman Prof Dr. Necla TEKTAŞ hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma süresince akademik katkılarını esirgemeyen tüm öğretim üyelerine, idari süreçlerde destek sağlayan Enstitü personeline, ayrıca çalışma ortamını kolaylaştıran tüm kurum ve kuruluşlara minnettarlığımı ifade ederim.

Çalışmanın yürütülmesi sürecinde sabır ve anlayışları ile her zaman yanımda olan aileme de teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Sezer ÜNAL

Bandırma, Aralık 2025

İÇİNDEKİLER

DOKTORA TEZİ ONAYI.....	iii
ETİK BEYAN SAYFASI	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiv
1. GİRİŞ	16
1.1. Problem Tanımı	17
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı	19
1.3. Yöntem ve Yaklaşım	20
1.3.1. Araştırma Tasarımı	21
1.3.2. Yöntemsel Araçlar	22
1.3.3. Sınırlılıklar	24
1.4. Hava Kirliliği Azaltımına Yönelik Literatür Çalışmaları.....	26
1.5. Literatürde ÇKKV ile Bitki Seçimi Örnekleri.....	30
2. ULAŞTIRMADAN KAYNAKLI HAVA KİRLİLİĞİ VE ETKİLERİ	33
2.1. Ulaştırma Sistemlerinin Emisyon Kaynakları	33
2.1.1. Egzoz Emisyonları	33
2.1.2. Buharlaştırma Emisyonları.....	34
2.1.3. Aşınma ve Yol Kaynaklı Emisyonlar	34
2.1.4. Altyapı Kaynaklı Emisyonlar	35
2.1.5. Emisyonların Maruziyet Üzerindeki Etkileri.....	35
2.2. Emisyon Kaynaklarının Karayolu Ulaşım Modları.....	35
2.3. Karayolu Taşımacılığı ve Kentsel Hava Kalitesi İlişkisi	37
2.4. Karayolu Ulaşımından Kaynaklı Emisyon Analizi	39
2.5. Emisyon Hesaplama Yöntemleri	42
2.6. Emisyon Envanterleri, Kılavuz ve Standartlar	51
2.6.1. Ulaşımından Kaynaklı Emisyon Envanterleri	52
2.6.2. Uluslararası Kılavuz ve Standartlar	53

2.7. Emisyon Hesaplama Programları	55
2.7.1. Ulusal ve Bölgesel Envanter Programlar	55
2.7.2. Kentsel ve Koridor Ölçekli Emisyon Modelleri	56
2.7.3. Atmosferik Dispersiyon Modelleri	56
2.7.4. Ekosistem Hizmeti Temelli Bitkisel Emisyon Azaltım Programları	57
2.8. Hava Kalitesi İzleme Sistemleri ve Ölçüm Yöntemleri	58
2.8.1. Emisyon Dağılım Modelleri ve CBS Entegrasyonu	63
2.9. Yol Bitkilendirme Uygulamaları ile Emisyon Azaltımı Çalışma Alanı	65
3. HAVA KİRLİLİĞİ AZALTIMINA YÖNELİK YÖNTEMLER VE STANDARTLAR	70
3.1. Uluslararası Standartlar ve Politika Belgeleri	71
3.2. Avrupa Birliği ve ABD Uygulamaları	76
3.3. Türkiye’de Yasal Düzenlemeler ve Politikalar	78
4. HAVA TEMİZLEMEDE KULLANILAN BİTKİLER VE ÖZELLİKLERİ	88
4.1. Bitkilerin Hava Kirleticilere Etkisi	88
4.1.1. Gaz Halindeki Kirleticiler Üzerindeki Etki	88
4.1.2. Partikül Madde (PM ₁₀ ve PM _{2.5}) Tutma Etkisi	88
4.1.3. Kirliliğin Maruziyet Seviyesini Azaltma	89
4.1.4. Tür Bazlı Performans Değerlendirmesi	89
4.2. Gaz ve Partikül Madde Emme Mekanizmaları	90
4.3. Ağaç ve Çalı Türlerinin Hava Temizleme Kapasitesi	92
4.4. Yaprak Yapısı, Genişliği ve Yüzey Özellikleri	93
4.5. Kentsel Yeşil Alan Planlamasında Bitki Seçimi	94
4.6. Bitki Yerleşim Stratejileri ve Mekânsal Uyum	100
5. MATERYAL VE YÖNTEM	104
5.1. Çalışma Alanı ve Materyal	104
5.2. Yöntemsel Yaklaşım	105
5.2.1. ÇKKV Yöntemleri	105
5.2.1.1. Problem Tanımı ve Kriterlerin Belirlenmesi	118
5.2.1.2. Alternatif Bitki Türlerinin Tanımlanması	119
5.2.1.3. Verilerin Analize Uygun Hale Getirilmesi	119
5.2.1.4. Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi (DEMATEL, SWARA, Entropi) ..	122
5.2.1.5. Alternatif Bitki Türlerinin Performans Analizi	137
5.2.2. Modelleme ve Simülasyon	141
5.2.3. CBS (GIS) Tabanlı Mekânsal Analizler	141

6. BULGULAR VE TARTIŞMA	143
6.1. ÇKKV ile Bitki Seçimi Sıralamaları	143
6.2. En Uygun Türlerin Belirlenmesi	146
6.3. Bitkilendirme Senaryoları	150
6.4. Analitik Bulgular ve Katkılar	154
6.5. Tartışma.....	156
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	159
KAYNAKÇA.....	165
EKLER.....	175
ÖZGEÇMİŞ	178

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1 Yeşil alan uygulamalarının nicel çıktıları.....	30
Tablo 1.2 ÇKKV ile bitki seçimi yapılan bazı önemli çalışmalar	32
Tablo 2.1 Farklı ulaşım modlarına ait emisyon faktörleri.....	37
Tablo 2.2 EEA (2019) ve IPCC (2006) tarafından yayımlanmış güncel değerler	43
Tablo 2.3 Dört (4) büyük şehre ait sayısal veriler.....	43
Tablo 2.4 Dört Büyükşehir'e Ait Emisyon Değerlerinin Tier 1 Yöntemine Göre Yaklaşık Değerleri (Tier 1 – 2024)	44
Tablo 2.5 TIER yöntemleri kullanımları.....	45
Tablo 2.6 COPERT'in kullanım amaçları	49
Tablo 2.7 COPERT – Tier 1 karşılaştırması	50
Tablo 2.8 İBB Hava kalitesi izleme istasyonları.....	59
Tablo 2.9 Ölçüm yöntemlerinin karşılaştırması.....	62
Tablo 3.1 Kirletici türlerine göre önerilen maruziyet sınır değerleri	71
Tablo 3.2 Başlıca kirleticilere ilişkin sınır değerler	73
Tablo 3.3 Kirleticiler ve hedef azaltımları	76
Tablo 3.4 Avrupa ve ABD karşılaştırmalı değerlendirme	78
Tablo 3.5 Hava Kalitesi Göstergeleri (PM _{2.5} – PM ₁₀ – NO ₂) Türkiye geneli 2025 ortalamaları	80
Tablo 3.6 İstanbul ulaşım altyapı ve emisyon göstergeleri.....	82
Tablo 3.7 Ankara hava kalitesi göstergeleri (2025)	84
Tablo 3.8 İzmir hava kalitesi göstergeleri (2025)	85
Tablo 3.9 İzmir öne çıkan projeler	86
Tablo 3.10 Bursa hava kalitesi göstergeleri (2025)	86
Tablo 3.11 Bursa BB temiz hava raporu	87
Tablo 4.1 Farklı türlerde bazı bitkilerin hava temizleme kapasiteleri	90
Tablo 4.2 Bazı kent ağaç ve çalı türlerinin PM tutma performansları	92
Tablo 4.3 i-Tree Eco girdiler ve çıktılar.....	95
Tablo 4.4 Çalışma alanında kullanılması hedeflenen bitki türlerinin emisyon azaltım değerlerinin i-tree modeli ile hesaplanması	96
Tablo 4.5 i – Tree modelinin uluslararası çalışma örnekleri.....	98
Tablo 4.6 Bitki türlerinin basit sınıflandırması	99
Tablo 4.7 Yol tipine göre yerleşim prensipleri	102
Tablo 4.8 Ulaşımda kullanılan bazı yol bitkileri.....	102
Tablo 5.1 Uygulama alanları ve değerlendirme kriterleri	108
Tablo 5.2 ÇKKV yöntemlerinin karşılaştırılması	109
Tablo 5.3 DEMATEL yönteminin araştırma konusunda kullanımı	111
Tablo 5.4 Örnek uygulama alanları.....	113
Tablo 5.5 SWARA yönteminin avantajları ve sınırlılıkları	113
Tablo 5.6 Entropi yönteminin avantajları ve dezavantajları	116
Tablo 5.7 Yaygın kullanılan hibrit yöntem kombinasyonları	117
Tablo 5.8 Hibrit modelin avantajları ve Sınırlılıkları.....	117
Tablo 5.9 ÇKKV kriterleri	118
Tablo 5.10 Kriter gruplandırmaları	119
Tablo 5.11 Kriterler arası nedensellik değerleri.....	123

Tablo 5.12	Normalize gösterge değerleri.....	124
Tablo 5.13	Toplam puanlar	124
Tablo 5.14	Nihai sonuçlar	125
Tablo 5.15	SWARA uzman görüşleri puanlaması.....	127
Tablo 5.16	SWARA kriter ağırlıklandırması	127
Tablo 5.17	Kriterlerinin normalize edilmiş ağırlıkları.....	128
Tablo 5.18	Ağaçlara ait birinci adım önem puanlamaları.....	129
Tablo 5.19	Normalize edilmiş alternatif seçimi	130
Tablo 5.20	Kriter ağırlıkları	132
Tablo 5.21	TOPSIS kriter ağırlıkları.....	133
Tablo 5.22	TOPSIS ağaçlar analizinin sonuçları	134
Tablo 5.23	TOPSIS çalılar analiz sonuçları.....	136
Tablo 5.24	TOPSIS yerörtücü ve sarılıcılar analiz sonuçları.....	136
Tablo 5.25	Ağaçlar TOPSIS puan sıralaması	138
Tablo 5.26	Çalılar TOPSIS puan sıralaması	138
Tablo 5.27	Yer örtücü ve sarılıcılar TOPSIS puanlaması.....	139
Tablo 6.1	Bitki seçiminde ÇKKV yöntemlerinin kullanılması sonucu nihai sıralama	144
Tablo 6.2	Ağaçlar ilk üç sıralama	146
Tablo 6.3	Çalılar ilk üç sıralama	148
Tablo 6.4	Yerörtücüler ve sarılıcılar ilk üç sıralaması.....	149
Tablo 6.5	Farklı sistemler ve uygulamalarla oluşturulan bitki senaryoları.....	150
Tablo 6.6	Oluşturulan senaryoların emisyon azaltım karşılaştırmaları	154
Tablo EK 1. 1	Uzman Bilgileri	175
Tablo EK 1. 2	Kriter Seti	175
Tablo EK 1. 3	Kriterler arası nedensellik ilişkisi (DEMATEL)	176
Tablo EK 1. 4	Kriter ağırlıklarının belirlenmesi (SWARA).....	176
Tablo EK 1. 5	Kriter bazında puanlama (TOPSIS).....	176

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1	Araştırma tasarımı akış diyagramı	22
Şekil 1.2	ÇKKV yöntemlerinin karşılaştırmalı uygulama diyagramı	23
Şekil 2.1	COPERT–AERMOD–i-Tree Eco entegre ekosistem hizmeti tabanlı emisyon azaltım modeli akış diyagramı.....	48
Şekil 2.2	İstanbul hava kalitesi izleme istasyonları	61
Şekil 2.3	Göztepe kavşağı uydu görünümü.....	65
Şekil 2.4	Göztepe kavşağı ve çalışma sahası	66
Şekil 2.5	Çalışma sahası günlük araç yoğunluğu.....	67
Şekil 2.6	Göztepe kavşağı 3B uydu katmanları ve trafik yoğunluğu.....	68
Şekil 2.7	Göztepe kavşağı yıl bazlı emisyon ölçüm değerleri	69
Şekil 3.1	İstanbul trafik emisyon ölçüm istasyonlarının günlük ortalama değerlerinin karşılaştırmalı PM10, NOx, CO karşılaştırması	81
Şekil 4.1	(a) bitki örtüsü bariyeri olmayan, (b) bitki örtüsü olan, (c) yeşil duvarlı açık yol konfigürasyonları altında yol kirleticilerinin dağılım modelleri	100
Şekil 4.2	Yol kenarındaki bitkilerin hava kirliliği etkilerini azaltmadaki yerleşim modelleri	101
Şekil 5.1	D100 Karayolu Göztepe Kavşağı batıdan doğuya perspektif.....	105
Şekil 5.2	D100 Karayolu Göztepe Kavşağı üstten görünüm	106
Şekil 5.3	DEMATEL yöntemi ile elde edilen neden–sonuç diyagramı.....	126
Şekil 5.4	Ağaçlar tüm alternatifler TOPSIS puan sırlaması	137
Şekil 5.5	Çalılar Entropy / SWARA karşılaştırmaları	139
Şekil 5.6	Yerörtücü ve sarılıcılara ait TOPSIS sırlaması	140
Şekil 6.1	Ağaçlar alternatiflerinin SWARA/Entropy ilk üç karşılaştırması (CC Yakınlık)	147
Şekil 6.2	Çalılar alternatiflerinin SWARA/Entropy ilk üç karşılaştırması (CC Yakınlık)	148
Şekil 6.3	Yerörtücüler ve sarılıcılar alternatiflerinin SWARA/Entropy ilk üç karşılaştırması (CC Yakınlık)	149
Şekil 6.4	Bitkilendirme senaryoları uygulaması	152
Şekil 6.5	Bitkilerin uygulanmasına ait yol kesit görünümü.....	153

KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
≈	: Yaklaşık
Kısaltmalar	Açıklama
AERMOD	: Atmosferik Dağılım Modeli (Air Quality Dispersion Model)
AHP	: Analitik Hiyerarşi Süreci
AQI	: Hava Kalitesi İndeksi (Air Quality Index)
BURULAŞ	: Bursa Ulaşım Toplu Taşıma İşletmeciliği Turizm Sanayi ve Ticaret A.Ş.
CAA	: Clean Air Act
CAAQMS	: Sürekli Ortam Hava Kalitesi İzleme Sistemi (Continuous Ambient Air Quality Monitoring System)
CALINE4	: Karayolu kaynaklı hava kirliliği dağılım modeli
CAMx	: Kapsamlı Atmosferik Modelleme Sistemi (Comprehensive Air Quality Model with Extensions)
CFD	: Computational fluid dynamics
CLRTAP	: Convention on Long-range Transboundary Air Pollution
CNG	: Sıkıştırılmış Doğal Gaz (Compressed Natural Gas)
CO	: Karbon monoksit
CO ₂	: Karbondioksit
COVID 19	: Corona Virus Disease
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
DEMATEL	: Karar Verme Deneme ve Değerlendirme Laboratuvarı Yöntemi (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory)
E. V	: Elektrik enerjisi ile çalışan motorlu taşıtlar (Electric Vehicle)
EEA	: European Environment Agency
EGO	: Ankara Elektrik, Havagazı ve Otobüs İşletme Müessesesi
EMEP/EEA	: Avrupa Çevre Ajansı Emisyon Envanteri Kılavuzu (European Monitoring and Evaluation Programme / European Environment Agency)
EMISIA S.A.	: Emisyon modelleme ve veri yazılımları geliştiren araştırma kuruluşu
Entropi	: Bilgi içeriğine dayalı objektif ağırlıklandırma yöntemi
ESHOT	: İzmir Büyükşehir Belediyesi toplu taşıma işletmesi
GIS	: Coğrafi Bilgi Sistemi (Geographic Information System)
HBEFA	: Handbook Emission Factors for Road Transport
HKDYY	: Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği
IEA	: International Energy Agency
INDC	: Ülkelerin sera gazı azaltım hedeflerini belirten uluslararası bildirim (Intended Nationally Determined Contribution)
IoT	: Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
IPA	: Instrument for Pre-Accession Assistance
IPCC	: The Intergovernmental Panel on Climate Change
IVE	: International Vehicle Emissions Model

İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
JRC	: Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi
JRC	: Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi (Joint Research Centre)
Kg	: Kilogram; kütle ölçü birimi
KOAH	: Kronik obstrüktif akciğer hastalığı
L	: Litre (Hacim ölçü birimi)
LPG	: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (Liquefied Petroleum Gas)
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MOVES	: Motor Vehicle Emission Simulator
MW	: Megawat
MW	: Megawatt (milyon watt elektrik gücü birimi)
NAAQS	: National Ambient Air Quality Standards
Ni	: Nikel
NO _x	: Azot oksitler
O ₃	: Ozon
OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development
OSB	: Organiz Sanayi Bölgesi
Pb	: Kurşun
PM ₁₀	: 10 mikrometreden küçük kaba partikül madde
PM _{2.5}	: 2.5 mikrometreden küçük ince partikül madde
SKA	: Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları
SKHP	: Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı
SO ₂	: Kükürt dioksit
SWARA	: Adım Adım Ağırlıklandırma Yöntemi (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis)
TEM	: Trans Avrupa Otoyolu Projesi (Trans-European Motorway)
THEP	: Temiz Hava Eylem Planları
Tier	: Kademe; emisyon hesaplama yöntemlerinde kullanılan seviyelendirme
TJ	: Terajoule (enerji birimi 1 TJ = 10 ¹² joule)
TMMOB	: Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
TOPSIS	: İdeal Çözüme Yakınlık Yöntemi (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)
TRANEM	: Transport Emission Model
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
UFORE	: Urban Forest Effects Model
UHKİA	: Ulusal hava kalitesi izleme ağı
UNEP	: United Nations Environment Programme
VKT	: Vehicle Kilometers Traveled
VNR	: Voluntary National Review
VOC	: Uçucu Organik Bileşikler (Volatile Organic Compounds)
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization)
WHO	: World Health Organization

1. GİRİŞ

Günümüzde kentleşme hızının artması, nüfus yoğunluğunun yükselmesi ve motorlu taşıt sahipliğindeki sürekli büyüme, kentsel ulaşım sistemlerinin yalnızca mekânsal açıdan değil, çevresel boyutta da sürdürülebilirliğini zorlayan temel faktörler hâline gelmiştir. Yoğunlaşan ulaşım faaliyetleri, hava kalitesini olumsuz etkileyen başlıca kirletici kaynaklardan birini oluşturmaktadır. Karayolu trafiğinden yayılan PM_{2.5}, PM₁₀ (Partikül maddeler) NO_x (Azot oksitler), CO (Karbon monoksit) ve CO₂ (Karbon dioksit) gibi hava kirleticiler, kentsel atmosferin fiziksel ve kimyasal bileşimini bozmakta; bu durum hem insan sağlığı üzerinde ciddi riskler doğurmakta hem de ekosistemlerin bütünlüğünü tehdit etmektedir. Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre, her yıl milyonlarca erken ölüm doğrudan hava kirliliği ile ilişkilendirilmekte ve bu kirliliğin önemli bir bölümü ulaşım kaynaklı emisyonlardan kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda ulaşım altyapılarının planlanması, klasik kapasite artırımı yaklaşımının ötesine geçerek çevresel etkilerin bütüncül biçimde ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Ulaşımdan kaynaklanan emisyonların azaltılmasına yönelik güncel yaklaşımlar, teknolojik dönüşümler kadar ekolojik temelli stratejileri de içermektedir. Özellikle yeşil altyapı bileşenleri arasında yer alan yol kenarı bitkilendirme uygulamaları, kent içi ulaşım koridorlarının çevresel performansını iyileştirmek için etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bitkiler; karbon sekestrasyonu, toz ve gaz filtreleme, gürültü azaltma, gölgeleme ve mikroiklim düzenleme gibi çok yönlü katkılarıyla kentsel yaşam kalitesini artırmaktadır. Bununla birlikte, bu potansiyelin etkin biçimde kullanılabilmesi, bitki türlerinin yalnızca estetik kaygılarla değil; hava kalitesi, bakım gereksinimi, iklim uyumu ve mekânsal uygunluk gibi bilimsel kriterlere dayalı olarak seçilmesini gerektirmektedir. Türkiye’de birçok uygulamada tür seçiminin hâlâ estetik tercihler veya erişilebilirlik gibi sınırlı değişkenlere bağlı yapılması, bitkilendirmenin hava kalitesi iyileştirme etkisini sınırlamakta ve potansiyel faydayı azaltmaktadır. Bu durum, sistematik ve veri temelli karar verme süreçlerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışması, kent içi ulaşım kaynaklı emisyonların yol kenarı bitkilendirme ile azaltılabilirliğini incelemeyi; bitki türlerinin çevresel performansının Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri aracılığıyla bilimsel bir çerçevede

değerlendirilmesini sağlamayı; böylece Türkiye'nin farklı büyükşehirlerinde uygulanabilir, ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bitki önerileri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Araştırmanın örnek alanı olarak, yoğun trafik yükü ve yüksek emisyon seviyeleri ile dikkat çeken D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı seçilmiştir. Bununla birlikte, geliştirilen değerlendirme modeli, yalnızca İstanbul için değil; Ankara, İzmir, Bursa gibi diğer büyükşehirlerde de uygulanabilir nitelikte tasarlanmıştır.

Çalışma kapsamında karayolu kaynaklı emisyonlar Tier 1 IPCC [1] yaklaşımına göre hesaplanmış; bitki türlerinin yıllık CO₂ tutumu, hava kirleticilerini filtreleme kapasiteleri ve bakım parametreleri i-Tree Eco yazılımı verileriyle desteklenmiştir. DEMATEL, SWARA, Entropi ve TOPSIS gibi ÇKKV yöntemleri kullanılarak kriterler arası ilişkiler analiz edilmiş, alternatif bitki türlerinin performansı sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Ağaç, çalı, yer örtücü ve sarılıcı türler olmak üzere toplam 32 bitki türü; hava kalitesi, ekolojik uyum, bakım gereksinimi ve mekânsal uygunluk gibi toplam 12 kriter doğrultusunda ayrı ayrı incelenmiştir.

Bu genel çerçevede çalışmanın temel hedefi, kent içi ulaşım koridorlarında uygulanabilir, maliyet etkin ve sürdürülebilir bitkilendirme politikaları geliştirmek; bu politikaların yerel yönetimlerin hava kalitesi eylem planlarıyla entegrasyonunu bilimsel veriler ışığında ortaya koymaktır. Böylece araştırma, kent planlaması, peyzaj mimarlığı ve çevre mühendisliği disiplinleri arasında köprü kuran, çok boyutlu ve veri destekli bir yaklaşım sunarak hem akademik literatüre hem de karar vericilere yönlendirici katkılar sağlamayı amaçlamaktadır.

1.1. Problem Tanımı

Yirmi birinci yüzyılda hızla artan kentleşme süreci, motorlu taşıt sahipliğindeki artış ve ulaşım altyapısının mekânsal olarak genişlemesiyle birlikte kent içi hava kalitesi önemli ölçüde baskı altına girmiştir. Özellikle karayolu taşımacılığı, büyük kentlerde PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x, CO ve CO₂ gibi yaygın kirleticilerin başlıca kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir [2]. Bu kirleticilerin yüksek konsantrasyonları yalnızca çevresel tahribata yol açmamakta, aynı zamanda solunum ve kardiyovasküler hastalıklar, erken ölümler, ekosistem bozulmaları ve iklim değişikliği gibi çok boyutlu sonuçlara neden olmaktadır. Emisyon yükünün büyük

kısının kent içi ulaşım sistemlerinden kaynaklandığı göz önünde bulundurulduğunda, bu sorun günümüzde hem çevresel hem de toplumsal sürdürülebilirlik açısından kritik bir öncelik hâline gelmiştir.

Kent merkezlerindeki yoğun trafik akışı, dar ve yapılaşma baskısı altındaki ulaşım koridorları ile birleştiğinde, emisyonların atmosferde seyrelmesi ve dağılması önemli ölçüde sınırlanmaktadır. Yapı blokları arasında oluşan sokak kanyonu etkisi, hava sirkülasyonunu zayıflatarak kirleticilerin yer seviyesinde birikmesine yol açmaktadır [3]. D-100 Karayolu gibi trafik hacmi yüksek ana arterlerde bu durum daha da belirginleşmekte; sürücüler, yayalar ve yol çevresinde yaşayan nüfus günlük olarak yüksek konsantrasyonda kirleticiye maruz kalmaktadır. Bu maruziyet, özellikle uzun süreli sağlık etkileri bakımından kritik bir risk unsuru oluşturmaktadır.

Kent içi ulaşım sistemlerinin emisyon üretimindeki payı dikkate alındığında, klasik kontrol yöntemlerinin (trafik iyileştirmeleri, araç teknolojilerindeki gelişmeler, yakıt kalitesinin artırılması gibi) önemli katkılar sunsa da tek başına kent merkezlerindeki kirletici yoğunluğunu hedeflenen düzeylere çekmekte yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle doğa tabanlı çözümler, son yıllarda ulaşım ve çevre planlaması politikalarında tamamlayıcı bir strateji olarak giderek daha fazla gündeme gelmektedir. Yol kenarı bitkilendirme uygulamaları, ağaç ve çalı türlerinin partikül madde ve gaz fazı kirleticileri tutma, filtreleme ve absorbe etme kapasiteleri sayesinde emisyon yönetiminde ekolojik bir araç olarak öne çıkmaktadır [4]. Bununla birlikte, bu uygulamaların etkinliği; seçilen bitki türünün morfolojisi, yaprak yüzey özellikleri, aerodinamik davranışları, bakım gereksinimi ve bölgesel iklim koşulları gibi birçok değişkene bağlıdır. Dolayısıyla bitkilendirmenin bilimsel verilere dayalı bir yaklaşımla planlanması gerekmektedir.

Türkiye’de yol kenarı bitkilendirme uygulamalarının büyük bölümünde tür seçimi çoğu zaman estetik tercihler, maliyet veya mevcut tür stoğu gibi sınırlı kriterlere dayanmaktadır. Bu durum, bitkilendirmenin hava kalitesini iyileştirici etkisini azaltmakta ve ekolojik işlevselliği geri plana itmektedir. Ayrıca tür seçiminin trafik hacmi, koridor geometrisi, rüzgâr yönü, sokak kanyonu derinliği ve emisyon tipleri ile ilişkilendirilmesine yönelik kapsamlı çalışmaların eksikliği, karar vericilerin bilimsel temelli yönlendirme ihtiyacını daha da artırmaktadır.

Bu tez çalışması, söz konusu bilimsel ve uygulamaya dönük boşlukları gidermeyi amaçlayarak D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı örneğinde kent içi ulaşım kaynaklı emisyonların azaltılmasında yol bitkilendirme uygulamalarının potansiyel etkinliğini ortaya koymayı hedeflemektedir. Bu doğrultuda hava kalitesi göstergeleri, bitki türlerinin aerodinamik ve biyolojik özellikleri, emisyon modelleme sonuçları ve ÇKKV yöntemleri bütünsel bir çerçevede ele alınacaktır. Böylece çalışma hem bilimsel literatüre katkı sağlamayı hem de yerel yönetimler ve uygulayıcılar için kanıta dayalı, uygulanabilir ve sürdürülebilir yönlendirmeler içermektedir.

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Ulaşımdan kaynaklanan çevresel baskılar, sürdürülebilir şehir planlamasının en önemli sorun alanlarından birini oluşturmaktadır. Özellikle karayolu ulaşımına bağımlı büyük metropollerde PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_x , CO, CO_2 ve diğer kirleticilerin yoğunlaşması, hem halk sağlığını tehdit eden bir risk faktörü hâline gelmekte hem de iklim değişikliğine katkı sağlayan emisyonların başlıca bileşenlerini oluşturmaktadır [4].

Mevcut kontrol önlemleri çoğunlukla teknolojik ve düzenleyici çözümler etrafında şekillenirken, doğa tabanlı çözümler özellikle yol bitkilendirme uygulamaları hem düşük maliyetli hem de ekolojik fayda sağlayan alternatifler olarak öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, kent içi ulaşım bileşenlerinden kaynaklanan emisyonların azaltılmasında bitkilendirme temelli çözümlerin etkinliğini değerlendirmek ve D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı özelinde uygulanabilir öneriler geliştirmektir. Bu çerçevede, hem bitki türlerinin emisyon azaltımı üzerindeki etkileri hem de kent içi yol kurgusu bağlamında bitkilendirme stratejileri çok boyutlu biçimde analiz edilecektir.

Çalışmanın özel amaçları aşağıda sıralanmıştır:

- Ulaştırma kaynaklı hava kirleticilerin fiziksel yayılım süreçlerinin ve maruziyet düzeylerinin analiz edilmesi,
- Hava kirleticilerini tutma/filtreleme kapasitesi bilinen bitki türlerinin morfolojik, fizyolojik ve aerodinamik özelliklerinin belirlenmesi,

- Bitki türlerinin emisyon tutma kapasitelerinin bilimsel verilere dayanarak karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi,
- Yol tipi, trafik yoğunluğu, mikroklimatik koşullar ve kent dokusuna uygun bitkilendirme stratejilerinin geliştirilmesi,
- ÇKKV yöntemleri ile kriter ağırlıklarının belirlenmesi ve en uygun bitki türlerinin seçilmesi,
- Elde edilen bulgular doğrultusunda yerel yönetimler, uygulayıcı birimler ve karar vericiler için uygulanabilir, ölçeklenebilir ve bilimsel temelli öneriler geliştirilmesi.

Tezin kapsamı şu şekilde sınırlandırılmıştır:

- Çalışma alanı olarak İstanbul ili sınırları içinde yer alan D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı seçilmiş olup, analizler bu bölgeye özgü trafik yoğunluğu, hava kalitesi verisi ve iklimsel koşullar temelinde yürütülmüştür.
- Bitki türleri seçimi, Türkiye'de kentsel alanlarda kullanılabilirliği olan ve bilimsel literatürde hava kalitesi üzerine etkisi kanıtlanmış türlerle sınırlandırılmıştır.
- Ulaşım türleri içerisinde yalnızca karayolu taşıtlarının neden olduğu emisyonlar dikkate alınmış, demiryolu ve deniz taşımacılığı kapsam dışı bırakılmıştır.
- Ölçümler için ikincil veri kaynakları, kamuya açık hava kalitesi veri setleri ve uzman görüşleri kullanılmıştır.
- Emisyonların nicel etkisi modelleme ve literatür destekli tahminleme ile yapılmış, yerinde doğrudan ölçüm gerçekleştirilmemiştir.

Bu tez, hava kalitesinin artırılması ve sürdürülebilir ulaşım altyapısının planlanmasına katkı sunmayı hedefleyen, doğa-temelli çözümleri veri destekli analizlerle birleştiren özgün bir çalışmadır.

1.3. Yöntem ve Yaklaşım

Bu tez çalışmasında, ulaşım kaynaklı emisyonların yol bitkilendirme ile azaltılmasına yönelik olarak karma yöntemli (mixed-method) bir araştırma stratejisi benimsenmiştir. Çalışma, hem nicel analiz (hava kalitesi verisi, bitki performansı, modelleme) hem de nitel değerlendirme (uzman görüşleri, literatür incelemesi) bileşenlerini içeren uygulamalı bir saha çalışması niteliğindedir.

1.3.1. Araştırma Tasarımı

Tezin araştırma yapısı, çalışmanın amacına ulaşmasını sağlayacak yöntemsel adımları ve analitik süreci ortaya koyacak şekilde aşağıda sunulmaktadır.

1. Kuramsal Çerçevenin Oluşturulması: Ulaştırma kaynaklı hava kirliliği, kentsel bitkilendirme ve hava temizleme mekanizmaları konularında kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Türkiye ve dünyadan örnek uygulamalar incelenmiş, emisyon azaltımında kullanılan bitki türleri belirlenmiştir.

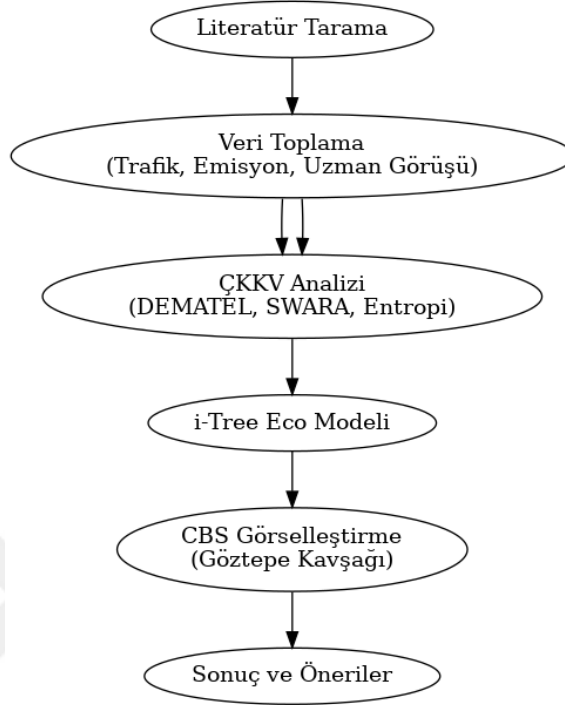
2. Veri Toplama Süreci: İkincil veriler: İstanbul'daki D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı'na ait trafik yoğunluğu, araç türleri, emisyon profilleri ve meteorolojik veriler çeşitli kurumsal kaynaklardan (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İBB Hava Kalitesi İzleme İstasyonları) temin edilmiştir.

Uzman görüşleri: Peyzaj mimarları, çevre mühendisleri ve ulaşım planlamacıları ile yarı yapılandırılmış görüşmeler gerçekleştirilmiştir.

3. Analiz Süreci: ÇKKV Yöntemleri; DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory), SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) ve Entropi yöntemleri bir arada kullanılarak hem kriter ağırlıkları belirlenmiş hem de bitki türlerinin seçiminde çok boyutlu analiz yapılmıştır. i-Tree Eco Modeli: Bitki türlerinin yıllık bazda emisyon tutma kapasiteleri bu modelle hesaplanmıştır [6]. Nowak ve arkadaşlarının [6] çalışmasına göre, ABD'de (Amerika Birleşik Devletleri) şehir ve topluluk/alanda bulunan ağaçlar birim ağaç örtüsü alanı başına ortalama 7,69 kg C/m² karbon depoluyor; yıllık karbon sekestrasyon oranı ise 0,28 kg C/m²/yıl civarındadır.

4. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS): Bitkilendirme senaryoları ArcGIS ortamında oluşturularak Göztepe Kavşağı çevresindeki mevcut yeşil doku analiz edilmiştir.

5. Öneri Geliştirme ve Sonuçlandırma: Analiz bulgularına dayalı olarak bölgeye özgü tür seçimi, bitkilendirme yoğunluğu ve koridor tasarımı önerilmiştir. Sonuçlar hem uygulamacılar hem de politika yapıcılar için karar destek aracı niteliğinde sunulmuştur.



Şekil 1.1 Araştırma tasarımı akış diyagramı

Çalışmanın temel prensiplerini oluşturan akış diyagramı Şekil 1.1’de gösterilmiş olup tezin oluşumunu ve ilerleme aşamalarını içermektedir.

1.3.2. Yöntemsel Araçlar

Bu tez çalışmasında, kent içi ulaşım kaynaklı emisyonların azaltılmasında yol bitkilendirme stratejilerinin etkinliğini çok boyutlu olarak değerlendirmek amacıyla nicel, mekânsal ve karar destek yöntemleri bir arada kullanılmıştır. Araştırmanın yöntemsel yaklaşımı hem çevresel verilerin analitik çözümlemesine hem de bitki türü seçimine yönelik sistematik karar verme süreçlerine dayanmakta olup aşağıdaki araçlardan oluşmaktadır.

i) İstatistiksel Analiz Araçları

Çalışmada kullanılan hava kalitesi, trafik yoğunluğu ve bitki türü performansına ilişkin verilerin temizlenmesi, sınıflandırılması ve temel istatistiksel çözümlemeleri için Excel, ileri düzey dağılım analizleri ve parametrik–parametrik olmayan karşılaştırmalar için Jamovi modelleme çıktılarının işlenmesinde kullanılmıştır.

ii) Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri

Bitki türlerinin çevresel, ekolojik ve mekânsal kriterler üzerinden bütüncül biçimde değerlendirilmesi amacıyla ÇKKV yöntemleri kullanılmıştır.

-DEMATEL (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory):

Kriterler arasındaki neden–sonuç ilişkilerini ortaya koymak ve sistemin etkileşim yapısını belirlemek amacıyla uygulanmıştır. Böylece hangi kriterlerin diğerlerini yönlendirdiği, hangilerinin karar mekanizmasında belirleyici olduğu analitik olarak ortaya çıkarılmıştır.

-SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis):

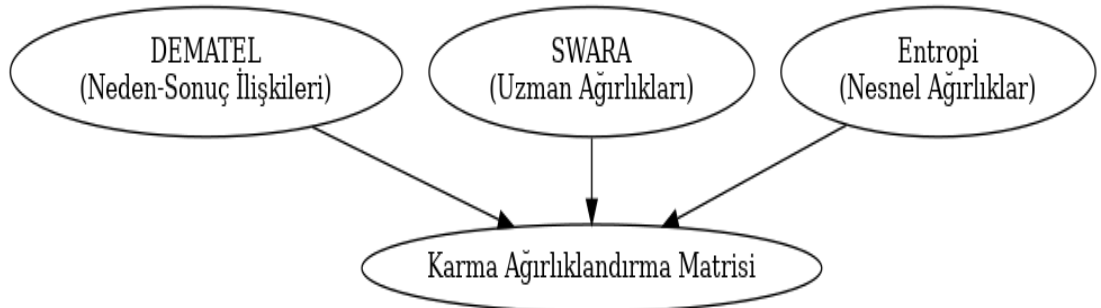
Uzman görüşlerini adım-adım değerlendiren bu yöntem, kriterlere ilişkin öznel ağırlıkları belirlemek için kullanılmıştır. SWARA, özellikle sürdürülebilirlik, bakım gereksinimi ve ekolojik uyum gibi yoruma dayalı kriterler için anlamlı ağırlıklandırma sağlamıştır.

-Entropi Yöntemi:

Veriye dayalı değişkenlik ölçümüne dayanan Entropi analizi, kriterlerin nesnel (objektif) ağırlıklarını belirlemiş; uzman görüşü temelli SWARA ile birlikte hibrit bir ağırlıklandırma yaklaşımı oluşturulmasına imkân tanımıştır.

-TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal

Solution): DEMATEL, SWARA ve Entropi ile belirlenen ağırlıkların ardından bitki türlerinin performans sıralamasını oluşturmak için uygulanmıştır. Bu yöntem, en ideal çözüme en yakın ve en kötü çözüme en uzak alternatiflerin belirlenmesini sağlayarak bitki türü seçimini sağlamıştır.



Şekil 1.2 ÇKKV yöntemlerinin karşılaştırmalı uygulama diyagramı

Şekil 1.2’de tez aşamasında kullanılan ÇKKV yöntemlerini ve bunların kriter belirlemesinden sonra ağırlıklandırılması ve hibrit yöntem ile seçimlerinin sonucunu temsil etmektedir.

iii) Modelleme ve Simülasyon Araçları

Bitki türlerinin emisyon tutma, karbon depolama, kirlilik filtreleme ve mikroklimatik katkı özelliklerini bilimsel olarak karşılaştırmak amacıyla i-Tree Eco yazılımı kullanılmıştır. Bu araç, her bitki türünün biyofiziksel özelliklerine dayalı olarak yıllık CO₂ tutumu, PM₁₀/PM_{2.5} tutma kapasitesi, gaz kirleticilerin absorpsiyonu ve ekosistem hizmeti üretim değerlerini modelleyen uluslararası ölçekte kabul görmüş bir simülasyon platformudur. Bu sayede türler arası performans farkları nicel olarak değerlendirilebilmiştir.

iv) Haritalama ve Mekânsal Analiz Araçları

Çalışma alanının mevcut yeşil altyapı yapısını, yol kenarı bitkilendirme potansiyelini, boşluk alanlarını ve trafik koridorlarını görsel olarak analiz etmek amacıyla CBS tabanlı haritalama yapılmıştır.

1.3.3. Sınırlılıklar

Bu tez çalışması, kent içi ulaşım kaynaklı emisyonların azaltılmasına yönelik bitkilendirme temelli bir yaklaşım geliştirmeyi amaçlamakla birlikte, kullanılan yöntemlerin kapsamı ve veri yapısına bağlı olarak çeşitli sınırlılıkları da içermektedir. Araştırmanın bulguları bu sınırlılıklar çerçevesinde değerlendirilmelidir.

-Saha ölçümlerinin bulunmaması: Çalışmada doğrudan yerinde ölçüm verileri kullanılmamış; emisyon tahminleri, hava kalitesi göstergeleri ve bitki türü performansları IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) Tier 1 modelleme yöntemi, i-Tree Eco simülasyonları ve uzman görüşleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bu durum, model sonuçlarının güvenilirliğini artıran standart yöntemlere dayanmasına rağmen, yerel mikroklimatik farklılıkların tam olarak yansıtılamamasına neden olabilmektedir. Sokak kanyonu etkisi, rüzgâr tünelleşmesi, nem/gradyan değişimleri gibi mikro ölçekli süreçler doğrudan ölçülmemiştir.

-Ulaşım türlerinin sınırlandırılması: Araştırma kapsamı, yalnızca karayolu taşımacılığı kaynaklı emisyonlarla sınırlandırılmıştır. Kent içi ulaşımın diğer bileşenleri olan demiryolu, deniz ulaşımı, bisiklet-patenci akışı ve yaya hareketliliği

analiz dışı bırakılmıştır. Bu tercih, çalışma alanı olan D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı'nın kullanım karakteristiği ve araştırma amacının doğrudan karayolu kaynaklı emisyonlar üzerinde yoğunlaşması nedeniyle yapılmıştır.

-Mevsimsel ve meteorolojik değişkenliklerin sınırlı ele alınması: Kirletici konsantrasyonları, yaprak yüzey yapışması, bitki fizyolojisi ve atmosferik yayılım gibi süreçler mevsimsel olarak önemli değişkenlik gösterebilmektedir. Ancak çalışmada analizler yıllık ortalama değerler üzerinden yürütülmüş; mevsimsel değişkenlikler ayrı bir modelleme konusu olarak ele alınmamıştır. Bu durum, özellikle yaprak dökümü olan türlerde yıllık ortalamaların filtreleme kapasitesi üzerinde sınırlı bir genelleştirme oluşturmaya yol açabilir.

-Bitki türü listesinin sınırlandırılması: Araştırmada değerlendirilen bitki türleri, Türkiye'de kentsel peyzaj uygulamalarında kullanılabilir olan ve literatürde hava kalitesi düzenleme kapasitesi hakkında veri bulunan türlerle sınırlı tutulmuştur. Veri eksikliği nedeniyle bazı yerel türler ya da potansiyel ekolojik adaylar kapsam dışında kalmıştır.

-Uzman görüşüne dayalı kriter ağırlıklarının öznel yapısı: SWARA yöntemi ile belirlenen kriter ağırlıkları, konu uzmanlarının bilgi birikimine ve değerlendirme çerçevelerine dayanmaktadır. ÇKKV yöntemlerinin yapısı gereği bu durum belirli bir öznel bileşen içermektedir. Bununla birlikte Entropi yöntemiyle nesnel ağırlıklar eklenerek öznellik önemli ölçüde dengelenmiştir; ancak tamamen ortadan kaldırılması mümkün değildir.

-CBS analizlerinde veri kesinliği: Mekânsal analizler, mevcut kadastral veriler, uydu görüntüleri ve yol kenarı boşluklarının güncel durumuna ilişkin açık veri setlerine dayanmaktadır. Ancak bazı alanlardaki güncelleme gecikmeleri veya arazi kullanımındaki hızlı değişimler haritalamaya sınırlı ölçüde yansımış olabilir. Bu sınırlılıklara rağmen çalışma, modelleme, simülasyon, ÇKKV analizleri ve mekânsal değerlendirmelerin bütüncül biçimde birlikte kullanılması sayesinde bilimsel geçerliliği yüksek, uygulamaya dönük, ölçeklenebilir bir emisyon azaltım stratejisi ortaya koymayı amaçlamaktadır.

1.4. Hava Kirliliği Azaltımına Yönelik Literatür Çalışmaları

Kentsel yeşil alanlar, kent ekosistemlerinin sürdürülebilirliğini destekleyen çok işlevli yapılar olarak yalnızca estetik ve rekreatif fayda sunmakla kalmamakta, aynı zamanda ulaşım kaynaklı hava kirliliğinin azaltılmasında biyofiziksel bir bariyer işlevi görmektedir. Ağaçlar, çalılar ve yeşil duvarlar aracılığıyla gerçekleşen biyolojik filtreleme mekanizmaları, PM, NO₂ ve CO gibi kirleticilerin yaprak ve yüzeylerde tutulması ile hava kalitesini belirgin biçimde iyileştirmektedir [23], [4]. Ayrıca yeşil alanlar, gölgeleme, evapotranspirasyon ve rüzgâr yönlendirme etkileri yoluyla kentsel ısı adası oluşumunu azaltmakta ve mikroklimatik iyileştirme sağlamaktadır. Bu nedenle dünya genelinde uygulanan yenilikçi yeşil altyapı projeleri, hava kalitesi yönetiminde etkili ve doğa tabanlı çözümler olarak öne çıkmaktadır.

-Dünya Genelinde Başarılı Kentsel Yeşil Alan Uygulamaları

- New York – MillionTreesNYC Programı (ABD): New York Belediyesi ve New York Restoration Project ortaklığıyla yürütülen MillionTreesNYC girişimi kapsamında kente 10 yılda bir milyonun üzerinde ağaç dikilmiştir. Nowak (2021) modellemesine göre kentteki ağaç örtüsü yılda yaklaşık 1.821 ton PM_{2.5} tutmakta ve bunun kentsel hava kalitesinde ölçülebilir iyileşme sağladığı rapor edilmiştir [73]. Program, ABD’de hava kalitesi iyileştirme çalışmalarının en geniş kapsamlı yeşil altyapı uygulamalarından biridir.
- Londra – Green Infrastructure & Urban Forest Strategy (Birleşik Krallık): Londra, “Urban Forest Strategy” kapsamında yaklaşık 8 milyon ağaç ile Avrupa’nın en büyük kentsel ormanlarından birine sahiptir. Yeşil duvar projeleri (ör. Edgware Road Green Wall), trafik koridorlarında PM ve NO₂ seviyelerinde %20’ye varan düşüş sağlamıştır [46]. İngiltere Çevre Bakanlığı ayrıca, yol kenarı ağaçlandırma bariyerlerinin kirletici dispersiyonunu minimize etmek için en etkili doğa tabanlı çözüm olduğunu vurgulamaktadır.
- Berlin – Tiergarten ve Yeşil Koridor Sistemi (Almanya): Berlin, kentsel planlama stratejisinde yeşil koridor ve nefes alma hatlarını (Luftleitbahnen) entegre ederek, hava akışının yoğun trafik bölgelerindeki kirleticileri dağıtmasını sağlayan bir “ekolojik koridor sistemi” oluşturmuştur. Bu yaklaşımın özellikle sıcak dönemlerde O₃ ve PM birikimini azalttığı tespit edilmiştir [74].

- Seul – Cheonggyecheon Ekolojik Koridoru (Güney Kore): Şehir merkezindeki otoyolun kaldırılarak yerine ekolojik bir yeşil koridor oluşturulması, Seul’ün kentsel ısı adası etkisini 3–5°C düşürmüş; PM10 konsantrasyonlarında %20’ye yakın azalma sağlanmıştır [75]. Proje, doğa tabanlı çözümlerin ulaşım kaynaklı kirliliği azaltmadaki etkisine yönelik en güçlü küresel örneklerden biridir.

- Milano – Bosco Verticale (İtalya): Bosco Verticale, dikey orman konseptinin öncüsü olarak, iki yüksek yapıda toplam 900’den fazla ağaç, 5.000 çalı ve 15.000 çok yıllık bitki içermektedir. Yapıların çevresindeki PM2.5 konsantrasyonunda lokal ölçekte anlamlı azalmalar rapor edilmiştir [76]. Uygulama, yeşil duvarların kentsel yoğun bölgelerde etkili bir çözüm olabileceğini göstermektedir.

- Singapur – City in a Garden Stratejisi: Singapur, yeşil duvarlar ve tropikal türlerle güçlendirilmiş dikey bahçelerle “kentsel ekosistem bütünleşmesini” hedefleyen bir ulusal strateji yürütmektedir. Araştırmalar, yoğun bitkilendirilmiş trafik koridorlarında PM tutulma kapasitesinin 3 kat arttığını göstermiştir [77].

Bu örnekler, kentsel yeşil alan uygulamalarının yalnızca çevresel değil, sosyal ve ekonomik fayda üretme kapasitesine de sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca kent ölçeğinde hava kalitesinin iyileştirilmesi, iklim uyumu, biyoçeşitlilik artırımı ve kentsel dirençliliğin güçlendirilmesi açısından doğa tabanlı çözümlerin stratejik önemini göstermektedir. Türkiye’de yol kenarı bitkilendirme ve yeşil altyapı uygulamalarının henüz sistematik bir çerçeveye kavuşmamış olması, küresel iyi örneklerin ulusal ölçekte uyarlanması önemli hâle getirmektedir.

Türkiye’de kentsel yeşil alanlar, özellikle son yıllarda iklim uyumu, ekosistem hizmetleri ve hava kalitesi iyileştirme politikalarının önemli bir bileşeni hâline gelmiştir. Büyükşehir belediyeleri başta olmak üzere birçok yerel yönetim, yeşil koridorlar, ağaçlandırma projeleri, dikey bahçeler ve kentsel ormanlaşma çalışmaları aracılığıyla ulaşım kaynaklı emisyonların azaltılması, ısı adası etkisinin hafifletilmesi ve ekolojik bağlantısallığın güçlendirilmesine yönelik uygulamalar gerçekleştirmektedir. Ancak Türkiye’deki uygulamaların büyük bir kısmı henüz hava kirliliği azaltımında bitki türü performansına dayalı bilimsel bir planlama çerçevesine tam anlamıyla kavuşmamış olup, mevcut örnekler çoğunlukla estetik ve rekreatif odaklıdır [27], [78].

-Türkiye’de Başarılı Kentsel Yeşil Alan Uygulamaları

- İstanbul – Dikey Bahçeler, Yeşil Koridorlar ve Kent Ormanları: İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından 2013–2019 yılları arasında ana arterler boyunca uygulanan dikey bahçe projeleri, özellikle E-5 ve TEM otoyolu koridorlarında mikro ölçekte hava kalitesine katkı sağlama potansiyeline sahip yenilikçi uygulamalardır. Araştırmalar, dikey bahçelerin bulundukları mikro çevrede PM konsantrasyonlarını %10–20 oranında azaltabildiğini göstermektedir [61]. Ayrıca İstanbul’un kuzeyinde yer alan kent ormanları (Atatürk Kent Ormanı, Beykoz Ormanları) kent içi soğutma etkisi, karbon yutağı kapasitesi ve biyoçeşitlilik gibi ekosistem hizmetleri açısından kritik öneme sahiptir [79].

- Ankara – Yeşil Kuşak Projeleri ve Yol Ağaçlandırma: Ankara’da özellikle Eskişehir Yolu, Konya Yolu ve İncek Bulvarı boyunca gerçekleştirilen yol kenarı ağaçlandırma çalışmaları, rüzgâr yönlendirme ve partikül tutma kapasitesi nedeniyle literatürde olumlu bir örnek olarak değerlendirilmektedir [80]. Bunun yanı sıra Ankara Büyükşehir Belediyesi’nin “Yeşil Kuşak Projesi”, kent makroformu etrafında yeni koridorlar oluşturarak hava sirkülasyonunu iyileştirmeyi ve ısı adası etkisini azaltmayı hedefleyen bir uygulamadır.

- İzmir – İklim Duyarlı Peyzaj ve Yeşil Altyapı Stratejileri: İzmir Büyükşehir Belediyesi’nin hazırladığı İzmir Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planı (SECAP) kapsamında, Konak, Karşıyaka ve Bayraklı bölgelerinde yeşil koridor ve kıyı ekosistemlerini güçlendirmeye yönelik kapsamlı projeler uygulanmaktadır. İzmir’in Akdeniz iklimine özgü bitki seçimi (örn. zeytin, defne, keçiboynuzu), düşük su tüketimi ve yüksek sıcaklık dayanımı ile iklim uyumlu peyzaj planlamasının Türkiye’deki öncü örnekleri arasındadır [81].

- Bursa – OSB Çevresinde Yeşil Tampon Bölgeler: Bursa’da, özellikle Gürsu ve Nilüfer ilçelerinde yer alan organize sanayi bölgeleri (OSB) çevresinde planlanan yeşil tampon bölgeler, sanayi ve ulaşım kaynaklı emisyonların yerleşim alanları üzerindeki etkisini sınırlamaya yönelik önemli bir yeşil altyapı stratejisidir. Sanayi tesisleri ile konut alanları arasına yerleştirilen yoğun ağaçlandırılmış yol aksları ve bitkisel şeritlerde *Cedrus libani*, *Cupressus sempervirens*, *Tilia tomentosa* gibi türlerin tercih edilmesi, hem partikül madde tutma kapasitesi yüksek hem de yerel iklim ve toprak koşullarına uyumlu bir bitkisel doku oluşturulmasına olanak vermiştir

[82]. İğne yapraklı ve geniş yapraklı türlerin birlikte kullanılması, yıl boyunca PM tutma, gürültü yutma ve görsel bariyer etkisinin sürekliliğini sağlamaktadır [82]. Böylece yeşil tampon bölgeler, sanayi–konut geçiş zonlarında hem ekolojik hem de peyzaj işlevleri açısından filtreleyici ve sınırlandırıcı bir ara yüz görevi üstlenmektedir.

- Konya – Geniş Ölçekli Ağaçlandırma ve Rüzgâr Yönlendirme: Konya Büyükşehir Belediyesi’nin geniş alanlara yayılan ağaçlandırma ve yeşil yol aksı projeleri, özellikle karasal iklim koşullarında toz taşınımının azaltılması açısından önemli görülmektedir. Çöl tozu etkisine açık bölgelerde bitkilendirme bariyerleri, mikro ölçekte hava kalitesi iyileştirmesine katkı sağlamaktadır [83].

- Gaziantep – Yeşil Şehir Eylem Planı: Gaziantep, Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası (EBRD) tarafından desteklenen “Green City Action Plan” kapsamında, yeşil altyapıyı güçlendirmeyi ve yol kenarı bitkilendirme projelerini stratejik ölçekte artırmayı hedeflemiştir. Planın hava kalitesi bileşeni kapsamında PM_{2.5} ve NO₂ azaltım hedefleri belirlenmiştir [84].

- Eskişehir – Tramvay Hattı Yeşil Kuşak Projesi: Eskişehir’de tramvay hatları boyunca oluşturulan sürekli yeşil bant, ulaşım kaynaklı hava kirleticilerin azaltılmasına yönelik önemli yeşil altyapı uygulamalarından biri olarak öne çıkmaktadır. Tramvay güzergâhları boyunca yol kenarı ağaçlandırmaları, çalı grupları ve çim alanlarla kurulan bu “yeşil kuşak”, özellikle PM₁₀ ve NO₂ konsantrasyonlarının düşürülmesinde biyolojik filtre işlevi görmektedir; hat boyunca süreklilik arz eden bitkisel doku sayesinde kirleticilerin yatay ve düşey yönlü yayılımını sınırlamaktadır. Bununla birlikte, bitkisel şeritler sert zemin yüzeyleri ile yerleşim alanları arasında akustik bariyer olarak da işlev görmektedir; trafik kaynaklı gürültünün iletimini azaltarak hem hava kalitesi hem de akustik konfor açısından bütüncül bir çevresel iyileşme sağlamaktadır [85]- [86].

Türkiye’deki örnekler, yeşil altyapı uygulamalarının giderek yaygınlaştığını göstermektedir; ancak bu uygulamaların çoğu henüz hava kirliliği azaltım performansına dayalı bilimsel tür seçimi, modelleme ve etkili yerleşim kriterleri açısından gelişime açıktır [27], [78]. Bu durum, tez kapsamında önerilen bilimsel temelli bitki türü seçimi ve çok kriterli değerlendirme yaklaşımının önemini artırmaktadır.

Tablo 1.1 Yeşil alan uygulamalarının nicel çıktıları

Uygulama Türü	Ölçülen Kirlenici	Azalma Oranı (%)
Yol kenarı ağaçlandırma	PM _{2.5}	15–25
Yeşil koridor (şehir içi)	NO ₂	10–18
Dikey bahçe	PM ₁₀	8–12
Yeşil çatı / çatı tarımı	CO ₂	~5(bina çevresi)

Yeşil altyapı oluşturulan bölgelerde yapılan çalışmalarda uygulama sonrası yapılan ölçüm ve değerlendirmeler Tablo 1.1’de verilmiş olup nicel olarak %25 gibi ciddi oranlarda hava kalitesilerinde iyileşmeler kaydedilmiştir [4], [44], [87]-[88].

1.5. Literatürde ÇKKV ile Bitki Seçimi Örnekleri

Kentsel yeşil alanlarda ağaç ve bitki türlerinin seçimi, yalnızca estetik değerler üzerinden değil; ekolojik dayanıklılık, bakım maliyetleri, gölge potansiyeli, alerjenite, çevresel katkılar ve kullanıcı ihtiyaçları gibi çok boyutlu kriterlere dayanmaktadır. Bu nedenle son yıllarda, ÇKKV yöntemleri bitki türü seçimi çalışmalarında yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Literatürde bu alana yönelik farklı ölçeklerde ve yöntemsel yaklaşımlarla yürütülmüş önemli araştırmalar bulunmaktadır. Bravo-Bello ve arkadaşları (2020), Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemini kullanarak kentsel alanlarda uygun ağaç türlerinin belirlenmesine yönelik kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir [118]. Çalışmada yerel ekolojik koşullar ve kullanıcı beklentileri dikkate alınmış; AHP’nin çok kriterli değerlendirmelerde sağladığı sistematik yapı vurgulanmıştır. Benzer şekilde Ghafari ve diğerleri (2020), ağaç, çalı ve çit türlerinin ekolojik potansiyelini değerlendirmiş; çok kriterli değerlendirme sürecinde türlerin çevresel işlevleri, uyum kabiliyeti ve bakım gereksinimleri öne çıkarılmıştır [119]. Bu tür çalışmalar, tür seçiminin yalnızca estetik değil, aynı zamanda ekolojik ve işlevsel boyutları da kapsaması gerektiğini göstermektedir.

Kentsel çevre için bitki türü belirlemede ÇKKV’nin kullanıldığı çalışmalarda, farklı ağaç türlerinin ağır metal tutma kapasitesi ve çevresel performansı kriter olarak ele alınmış ve çok kriterli sıralamalar yapılmıştır. Benzer şekilde, alerjenite kriterinin literatüre yansıtıldığı çalışmalarda, Nowak ve diğerleri (2021) ile Sousa-Silva ve arkadaşları (2021), türlerin polen üretimi ve alerjik riskleri üzerinden tür seçiminin kentsel sağlık politikalarına etkilerini vurgulamışlardır [73], [120]. Bu bağlamda,

ÇKKV yöntemlerinin yalnızca ekolojik değil, aynı zamanda toplumsal sağlık boyutunu da içine alacak şekilde kullanılabileceği görülmektedir.

Türkiye bağlamında da ÇKKV yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Zengin (2016), peyzaj planlamasında TOPSIS yöntemini kullanarak Erzurum özelinde örnek bir uygulama yapmış; peyzaj desenlerinin önceliklendirilmesinde ÇKKV'nin güçlü bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur [121]. Benzer biçimde Ustaoglu ve arkadaşları (2020), bulanık mantık ve AHP yöntemlerini entegre ederek yeşil alan uygunluk analizi geliştirmiştir [122]. İstanbul bağlamında ise Köse ve diğerleri (2025), R'WOT yöntemiyle kentsel ormanların stratejik planlamasını yapmış; Aksu ve diğerleri (2023) AHP ile yapay yüzey-ekosistem ilişkilerini değerlendirmiştir. Ayrıca Nesticò ve arkadaşları (2022), park alanlarının optimum konumlandırılmasında çok kriterli yöntemleri uygulamış ve farklı mekânsal kriterlerin nasıl entegre edilebileceğini göstermiştir [123]-[124]-[125].

Son yıllarda yapılan sistematik derleme çalışmalarında da ÇKKV'nin ormancılık ve peyzaj alanındaki kullanımı özetlenmiştir. Kpadé ve arkadaşları (2024), 2010–2024 yılları arasında ormancılıkta kullanılan ÇKKV yöntemlerini değerlendirmiş; yöntemlerin uygulama alanları ve avantajlarını karşılaştırmıştır [126]. Ayrıca Carol-Aristizabal ve diğerleri (2024), kentsel stres faktörlerine en dayanıklı türlerin seçimi için uzman görüşlerini ve ÇKKV yöntemlerini bir arada kullanmış; Gašparović ve arkadaşları (2023) ise alerjen türlerin mekânsal dağılımını uzaktan algılama ile haritalayarak tür seçiminde “alerjenite” kriterinin önemine dikkat çekmiştir [127]-[128].

Bu literatür genel olarak göstermektedir ki, ÇKKV yöntemleri (AHP, TOPSIS, Bulanık AHP, vb.), bitki türü seçiminde sistematik, şeffaf ve tekrarlanabilir bir çerçeve sunmaktadır. Kriterler yalnızca estetik ve görsel etkilerle sınırlı kalmamakta; ekolojik katkılar, sağlık riskleri, bakım gereksinimleri, altyapı uyumu ve sürdürülebilirlik boyutlarını da kapsayacak biçimde genişletilmektedir. Dolayısıyla, tez kapsamında geliştirilecek yöntemsel yaklaşımın literatürdeki bu uygulamalardan yararlanarak, İstanbul özelinde hem ekolojik hem de sosyo-teknik kriterleri bütüncül biçimde ele alması önem arz etmektedir.

Tablo 1.2 ÇKKV ile bitki seçimi yapılan bazı önemli çalışmalar

Yazar(lar)	Yıl	Çalışma Başlığı	Yöntem	Çalışma Alanı / Konu
Aksu, Erdoğan & Kaya	2023	Evaluation of artificial surface–urban ecosystem relations by using AHP	AHP	İstanbul – Yapay yüzey ve ekosistem ilişkileri
Bravo-Bello, Ortiz-Moreno & Pineda-Cortel	2020	The analytic hierarchy process for selection of suitable trees in urban areas	AHP	Kentsel alanlarda uygun ağaç türleri
Carol-Aristizabal, Roldán & Osorio	2024	Which tree species best withstand urban stressors?	Uzman görüşü + MCDM	Kentsel stres faktörlerine dayanıklılık
Gašparović, Medak & Novák	2023	Mapping allergenic tree species in highly urbanized areas	Uzaktan algılama + MCDM	Alerjen türlerin mekânsal dağılımı
Ghafari, Jalali & Attarod	2020	Ecological potentials of trees, shrubs and hedge species in urban environments	ÇKKV (ekolojik potansiyel analizi)	Ağaç/çalı/çit türlerinin ekolojik potansiyeli
Kpadé, Tchatchou & Ngomanda	2024	Evaluating MCDM methods for forest management: A systematic review	Sistemik derleme (ÇKKV yöntemleri)	Ormancılıkta ÇKKV uygulamaları
Köse, Demir & Çelik	2025	R’WOT-based strategic planning and management for urban forests: The case of Istanbul	R’WOT	İstanbul kentsel orman planlaması
Nesticò, Guarini & Sica	2022	Multi-criteria methods for the optimal localization of urban parks	MCDM (çok kriterli yöntemler)	Kentsel parkların konum seçimi
Nowak, Hirabayashi, Bodine & Greenfield	2021	Variations in urban forest allergy potential based on pollen production	AHP-tabanlı değerlendirme	Kentsel ormanlarda polen üretimi
Sousa-Silva, Honrado & Lomba	2021	Strong variations in urban allergenicity riskscapes	MCDM (risk haritalama)	Alerjenite risk manzaraları
Ustaoglu, Aydinoglu & Caglayan	2020	Site suitability analysis for green space development using fuzzy set and AHP	Bulanık set + AHP	İstanbul yeşil alan uygunluk analizi
Zengin	2016	Peyzaj planlamada TOPSİS yöntemi ve Erzurum örneği	TOPSIS	Erzurum peyzaj planlaması

ÇKKV ile bitkiler ve bitki seçimi üzerine yapılmış önemli çalışmalar Tablo 1.2’de verilmiştir [124], [118], [127]-[128], [119], [126], [123], [125], [4], [120], [122], [121].

2. ULAŞTIRMADAN KAYNAKLI HAVA KİRLİLİĞİ VE ETKİLERİ

Kentsel ulaşım sistemleri, özellikle büyükşehirlerde enerji tüketimi ve sera gazı salımı açısından en yoğun kaynaklardan biridir. Motorlu taşıtlar, fosil yakıt kullanımına dayalı olarak karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x), sülfür dioksit (SO₂), partikül maddeler (PM₁₀ ve PM_{2.5}) ve uçucu organik bileşikler VOC (Volatile Organic Compounds) gibi pek çok zararlı bileşeni atmosfere salmaktadır [2]. Bu durum hem insan sağlığı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi riskler yaratmaktadır.

2.1. Ulaştırma Sistemlerinin Emisyon Kaynakları

Kent içi ulaşım sistemleri, fosil yakıtı dayalı araç teknolojileri nedeniyle hava kirleticilerin başlıca kaynakları arasında yer almaktadır. İçten yanmalı motorlara sahip taşıtlardan salınan kirleticiler, hem yer seviyesinde hava kalitesini düşürmekte hem de küresel sera gazı birikimini artırmaktadır. Ulaştırma sektöründen kaynaklanan emisyonlar genellikle egzoz emisyonları, buharlaşma emisyonları, aşınma kaynaklı emisyonlar ve altyapı kaynaklı emisyonlar olarak sınıflandırılmaktadır [2]-[5]-[7]-[8], [9].

2.1.1. Egzoz Emisyonları

WHO (World Health Organization) ve EEA (European Environment Agency)' in tanımlamasına göre; egzoz emisyonları, motorun çalışması sırasında yakıtın tam veya eksik yanması sonucunda oluşan gaz ve partikül madde salımlardır. Başlıca bileşenleri şunlardır [8], [2].

- **CO₂**: Fosil yakıtların yanması sonucu doğrudan salınır; iklim değişikliğinin temel etkenidir.
- **CO**: Eksik yanma sonucu ortaya çıkar. Zehirleyici etkisi nedeniyle insan sağlığı açısından tehlikelidir.
- **NO_x**: Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen yanma sonucu oluşur. Ozon (O₃) oluşumunu tetikler, asit yağmurlarına neden olur.
- **VOC**: Hem doğrudan zehirlidir hem de fotokimyasal smog oluşumuna katkı sağlar.

- **PM₁₀ ve PM_{2.5}:** Özellikle dizel motorlardan salınan ince partiküller; solunum yolu rahatsızlıklarına yol açmaktadır [10].

Dizel motorlu araçlar, benzinli araçlara göre daha düşük CO emisyonu üretse de NO_x ve PM emisyonlarında daha yüksektir [2].

2.1.2. Buharlaştırma Emisyonları

Buharlaştırma emisyonları, araç yakıt sistemlerinden atmosfere salınan benzin buharı kaynaklı VOC emisyonlarıdır. Bu emisyonlar genellikle üç başlık altında toplanır:

- **Çalışma emisyonları (Running Losses):** Araç çalışırken oluşan buharlaşmalar.
- **Sıcak emisyonlar (Hot Soak):** Motor kapatıldıktan sonra yüksek sıcaklık nedeniyle gerçekleşen buharlaşma.
- **Gece buharlaşmaları (Diurnal):** Sıcaklık değişimlerine bağlı olarak depo sisteminde oluşan VOC salımı.

Benzinli araçlarda bu tür emisyonlar, toplam VOC emisyonlarının önemli bir kısmını oluşturur [7].

2.1.3. Aşınma ve Yol Kaynaklı Emisyonlar

Ulaştırma sistemleri yalnızca yanma süreciyle değil, mekanik temas ve yol altyapısının fiziksel etkileriyle de emisyon üretir. Bu emisyonlar genellikle şu şekilde oluşur:

- **Fren Aşınması:** Fren balataları ve disklerinin sürtünmesiyle oluşan metalik ve karbon bazlı partiküller.
- **Lastik Aşınması:** Yol yüzeyi ile lastik arasındaki temas sonucu mikro plastik ve kauçuk partiküller ortaya çıkar.
- **Yol Tozu:** Yol yüzeyindeki toprak, kum ve inorganik parçacıkların araç hareketiyle havaya karışmasıdır [4].

Bu tür “non-exhaust” (egzoz dışı) emisyonlar, özellikle yol tozu yeniden süspansiyonu kaynaklı olanlar, toplam PM₁₀ emisyonlarının %40’a kadarını oluşturabilmekte ve özellikle şehir merkezlerinde maruziyet riski açısından kritik bir bileşen olarak değerlendirilmektedir [5].

2.1.4. Altyapı Kaynaklı Emisyonlar

Ulaştırma altyapısının kendisi de dolaylı emisyon kaynakları üretir. Bunlar arasında: Asfalt üretimi ve serimi sırasında VOC ve NO_x salımı, trafik sinyalizasyonu, aydınlatma sistemleri ve otopark alanlarının enerji tüketimi, araç park manevraları ve rölanti sırasında gerçekleşen mikro emisyonlar yer alır. Bu tür etkiler, genellikle kentsel karbon ayak izinin “görünmeyen” bileşenleri arasında yer alır [7].

2.1.5. Emisyonların Maruziyet Üzerindeki Etkileri

Ulaştırma kaynaklı emisyonların, özellikle çocuklar, yaşlılar ve astım hastaları üzerinde doğrudan sağlık etkileri olduğu kanıtlanmıştır. WHO [8] yayınladığı raporda yıllık PM_{2.5} maruziyetinin çocuklarda akciğer fonksiyonlarını kalıcı biçimde bozduğunu ve kronik hastalıkları tetiklediğini belirtmektedir. Egzoz emisyonlarının yoğun olduğu kavşak ve koridor alanlarında bitkilendirme çözümleri, bu tür maruziyetleri azaltabilecek etkili önlemler olarak değerlendirilmektedir [11].

2.2. Emisyon Kaynaklarının Karayolu Ulaşım Modları

Ulaştırma sistemlerinin çevresel etkileri, kullanılan taşıma modunun enerji kaynağına, teknolojik özelliklerine, doluluk oranına ve kullanım yoğunluğuna göre değişiklik göstermektedir. Fosil yakıta dayalı özel araç kullanımı hem kişi başına emisyon hem de trafik kaynaklı hava kirliliği açısından en yüksek çevresel yükü oluşturmaktadır [15]. Buna karşılık, toplu taşıma, bisiklet ve yaya ulaşımı gibi düşük karbonlu ulaşım biçimleri, daha sürdürülebilir alternatifler sunmaktadır.

Özel Araçlar (Benzinli ve Dizel): Özel otomobiller, düşük doluluk oranı (ortalama 1,3 kişi/araç) nedeniyle kişi başı emisyon üretiminde en verimsiz ulaşım türlerinden biridir. Avrupa Birliği verilerine göre ortalama bir benzinli aracın CO₂ emisyonu 180–250 g/km, dizel bir aracın ise 150–200 g/km düzeyindedir [12]. Egzozdan salınan CO, NO_x ve PM₁₀ düzeyleri özellikle kent merkezlerinde yoğun trafik saatlerinde kritik eşiklerin üzerine çıkmaktadır. Ayrıca dizel araçlar, karbon emisyonu bakımından benzinli araçlara göre daha verimli görülsede, NO_x ve PM_{2.5} emisyonları açısından daha kirliticidir [9]. Özellikle eski model dizel araçların egzoz filtreleme sistemleri yetersiz olduğundan, kentsel hava kalitesi üzerinde olumsuz etkileri büyüktür.

Toplu Taşıma (Otobüs, Metro, Banliyö Treni): Toplu taşıma araçları, kişi başı düşen emisyon miktarı açısından daha verimli ulaşım seçenekleri sunar. Örneğin bir şehir içi otobüs tam dolulukla çalıştığında kişi başına CO₂ salımı 40–80 g/km düzeyindedir [13]. Ancak bu değer, araç tipi, yakıt türü (dizel, doğalgaz, elektrik), motor standardı ve filo yaşı gibi faktörlere bağlı olarak değişir.

Elektrikli raylı sistemler (metro, tramvay gibi), özellikle elektrik üretimi yenilenebilir kaynaklardan sağlandığında neredeyse sıfır doğrudan emisyonu sahiptir. Ancak, Türkiye gibi ülkelerde elektrik şebekesinin önemli bir bölümü hâlâ doğal gaz ve kömüre dayalı olduğundan, dolaylı emisyonlar (upstream emissions) dikkate alınmalıdır [14].

Alternatif Yakıtlı ve Elektrikli Taşıtlar: Elektrikli araçlar, egzoz emisyonu üretmedikleri için kent merkezlerinde hava kalitesine katkı sağlarlar. Ancak bu araçların üretim sürecindeki karbon ayak izi ve kullanılan elektrik kaynağına göre tam yaşam döngüsü emisyonları (well-to-wheel) değerlendirilmelidir.

IEA (International Energy Agency) (2023) verilerine göre bir elektrikli otomobilin yaşam döngüsü CO₂ emisyonu, içten yanmalı benzinli araçlara göre %50–70 daha azdır, ancak bu oran enerji altyapısının temizliği ile doğru orantılıdır [15]. Ayrıca hidrojen yakıtlı taşıtlar, şu anda sınırlı düzeyde yaygın olsa da sıfır emisyonlu ulaşım sistemleri arasında yer almaktadır. Ancak üretim süreçlerinde hâlen fosil yakıt kullanımı yoğun olduğu için net sıfır etkisine ulaşmaları zaman alacaktır [15].

Mikromobilité ve Aktif Ulaşım (Bisiklet, Yaya): Bisiklet ve yaya ulaşımı tamamen emisyonuz olup hem çevresel hem de sağlık açısından en sürdürülebilir ulaşım türlerindendir. Ayrıca mikro-mobilité araçları (e-scooter, e-bisiklet) kısa mesafeli yolculuklarda özel araç kullanımının yerine geçerek kent içi emisyonları önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Ancak e-scooter gibi araçların yaşam döngüsü analizleri, özellikle kısa ömürleri ve yoğun batarya kullanımı nedeniyle dikkatle değerlendirilmelidir. Çin'in ve ABD'nin çeşitli kentlerinde yapılan kapsamlı bir analizde, paylaşımlı elektrikli scooterların kullanım başına enerji tüketiminin özel otomobillere göre daha düşük olmakla birlikte, toplu taşıma ve yaya/bisiklet gibi modlara kıyasla daha yüksek olabileceği belirtilmiştir [16]. Özellikle taşıma ve yeniden konumlandırma süreçlerinde tüketilen enerji, toplam çevresel etkinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Tablo 2.1 Farklı ulaşım modlarına ait emisyon faktörleri

Ulaşım Türü	Ortalama CO ₂ (g/km/kişi)	Başlıca Kirleticiler	Sürdürülebilirlik Düzeyi
Benzinli Otomobil	180–250	CO ₂ , CO, VOC, PM, NO _x	Düşük
Dizel Otomobil	150–200	NO _x , PM _{2.5} , CO ₂	Düşük
Otobüs (Dizel)	60–120	NO _x , PM, CO ₂	Orta
Metro/Tramvay	20–50	Dolaylı CO ₂	Yüksek
Elektrikli Otomobil	50–100 (dolaylı)	Dolaylı CO ₂	Orta–Yüksek
E-Scooter/Bisiklet	0–30 (e-scooter)	Dolaylı CO ₂ (batarya)	Yüksek
Yaya	0	Yok	Çok Yüksek

Tablo 2.1’de farklı ulaşım modlarına ait emisyon faktörleri ve bunlara ait tüketim sonrası ortaya çıkan emisyon değerleri listelenmiştir [12].

2.3. Karayolu Taşımacılığı ve Kentsel Hava Kalitesi İlişkisi

Kentleşme süreciyle birlikte artan motorlu taşıt kullanımı, şehirlerde hava kalitesinin bozulmasında en önemli etkenlerden biridir. Ulaştırma kaynaklı emisyonlar, başta NO₂, CO, PM_{2.5} ve O₃ olmak üzere pek çok zararlı bileşeni içermekte; bu kirleticilerin kent merkezlerinde yoğunlaşması, kanser, nörolojik bozukluklar ve kardiyopulmoner hastalıklar başta olmak üzere çeşitli sağlık sorunlarıyla doğrudan ilişkilendirilmektedir [17]. Özellikle trafiğin yoğun olduğu bölgelerde yaşayan bireylerde astım, KOAH (Kronik obstrüktif akciğer hastalığı) ve akciğer kanseri riskinin belirgin şekilde arttığı bilimsel olarak ortaya konmuştur.

-Hava Kalitesi Üzerindeki Etkiler: Ulaşım faaliyetleri sırasında salınan kirleticiler, özellikle yoğun trafik saatlerinde ve hava sirkülasyonunun düşük olduğu bölgelerde ciddi emisyon birikimine yol açmaktadır. Bu birikim, “mikroçevresel hava kirliliği cepleri (pollution hotspots)” olarak adlandırılır ve genellikle kavşaklar, tüneller ve yüksek binalarla çevrili sokaklarda ortaya çıkar [18].

NO₂ ve PM_{2.5} düzeyleri, trafiğin yoğun olduğu arterlerde daha yüksek değerlerde seyretmektedir. Sokak kanyonu etkisi, hava akımının sınırlandırılması nedeniyle kirleticilerin dağılmasını engeller ve maruziyet süresini artırır. Toplu taşıma durakları, sinyalizasyon kavşakları ve yaya geçitleri, yayaların en yüksek solunum riskine maruz kaldığı noktalardır [19].

-Sağlık Üzerindeki Etkiler: Kentsel alanlardaki ulaşım kaynaklı hava kirleticilere maruz kalmak, başta çocuklar, yaşlılar, hamileler ve solunum rahatsızlığı olan bireyler olmak üzere tüm nüfus grupları için sağlık riski oluşturmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'ne göre, kentlerdeki hava kirliliğine bağlı ölümlerin önemli bir kısmı ulaşım kaynaklı emisyonlarla ilişkilidir [20]. Özellikle PM_{2.5}'nin kronik maruziyeti;

- Astım ve bronşit semptomlarının artışı,
- Akciğer fonksiyonlarında azalma,
- Kalp-damar hastalıklarında artış,
- Çocuklarda beyin gelişimi ve doğum öncesi sağlık riskleriyle ilişkilidir

[21].

-Emisyon Dağılımı ve Alan Farklılıkları: Hava kirliliği kent içinde mekânsal olarak düzensiz dağılır. Emisyonların yoğunluğu ve birikimi; trafik yoğunluğu, yol tipi, rüzgâr yönü, bina düzeni ve mikroklimatik koşullar gibi faktörlerden önemli ölçüde etkilenir. Defra ve AQEG (2020) raporuna göre, Birleşik Krallık'ta COVID-19 döneminde özellikle ulaşım sektöründeki aktivitelerdeki azalma, NO_x emisyonlarında tipik olarak %30-40 arası düşüşe yol açmış; NO₂ konsantrasyonlarında da benzer biçimde azalma gözlenmiştir [22]. Ancak PM_{2.5} sonrası formlar ve sınır ötesi kirleticilerin etkisi nedeniyle partikül madde azaltımlarının boyutu bölgeden bölgeye değişmektedir. Rapor ayrıca, meteorolojik faktörler konsantrasyonlardaki değişimlerin büyük bir kısmını açıklamakta; hava durumu normalleştirilmesi yapıldığında, NO₂'deki düşüşler daha net gözükmetedir [22].

Ana arter yollar ve ekspres yollar, en yüksek emisyon değerlerine sahip bölgeler olup, bu bölgelerde yaşayanlar daha yüksek sağlık riskine maruz kalmaktadır. Yeşil alanlar ve açık parklar, çevresindeki kirleticilerin bir kısmını absorbe ederek doğal bir tampon bölge işlevi görmektedir [23]. Bitkilendirme, hem fiziksel bariyer görevi görerek kirletici yayılımını sınırlamakta hem de yaprak yüzeyinde kirletici tutarak PM azaltımı sağlamaktadır. İstanbul gibi mega şehirlerde, özellikle D-100 Karayolu, TEM (Trans European Motorway) Otoyolu ve çevresindeki bölgelerde yapılan ölçümler, ulaşım kaynaklı emisyonların WHO eşik değerlerinin üzerinde seyrettiğini göstermektedir [24]. Özellikle sabah ve akşam saatlerinde, PM₁₀ ve NO₂ seviyeleri kısa süreli pikler göstermektedir.

2023 yılı Kadıköy-Göztepe bölgesi ölçümlerine göre, PM_{2.5} konsantrasyonları sabah saatlerinde 35–55 µg/m³ aralığında ölçülmüş, WHO sınırı olan 15 µg/m³ değerinin 2–3 katı üzerine çıkmıştır. Yol kenarı bitkilendirme uygulamaları, sadece estetik veya peyzaj işleviyle değil, aynı zamanda trafik kaynaklı hava kirleticilerin yaya seviyesindeki dağılımını düzenleyen aerodinamik bir unsur olarak da değerlendirilmektedir. Aini ve Shen (2020), farklı ağaç yerleşim desenlerinin CO₂ konsantrasyonu üzerindeki etkilerini analiz ettikleri çalışmada, ağaç sıklığı ve yerleşim biçiminin, kirleticilerin yayılma yönü ve yoğunluğu üzerinde doğrudan belirleyici olduğunu göstermiştir [25]. Özellikle sıralı ve yoğun ağaçlandırma örüntülerinin, CO₂'nin yaya seviyesinde birikimini artırabileceği; buna karşın aralıklı ve kenar odaklı ağaçlandırmanın hem hava akışını koruduğu hem de kirleticiler konsantrasyonlarını azaltmada daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, yol bitkilendirme stratejilerinin sadece tür seçimi değil, konumlandırma ve düzenleme geometrisi açısından da bilimsel temellere dayalı olarak planlanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

-Politik ve Planlama Yansımaları: Kent içi ulaşım planlamasında hava kalitesinin göz önünde bulundurulması, artık bir zorunluluk haline gelmiştir. Avrupa Birliği'nin “Yeşil Mutabakatı” (Green Deal), kent içi ulaşımında sıfır emisyon hedefi belirlemektedir. Bu hedefe ulaşmak için;

- Özel araç kullanımının azaltılması,
- Toplu taşımanın teşviki,
- Yol kenarı yeşil altyapı uygulamaları,
- Yayalaştırma projeleri ve bisiklet altyapısı yatırımları gibi çok boyutlu

stratejiler önerilmektedir [26].

Türkiye’de ise 2022 yılında güncellenen Temiz Hava Eylem Planları, ulaşım kaynaklı emisyonların azaltılması için belediyelere bitkilendirme dahil çeşitli eylem adımları sunmuştur [27].

2.4. Karayolu Ulaşımından Kaynaklı Emisyon Analizi

Ulaştırma sektörü, dünya genelinde enerji tüketimi ve hava kirleticiler açısından en baskın sektörlerden biridir. Uluslararası Enerji Ajansı’na (IEA, 2023) göre, küresel karbon dioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık %24’ü ulaşım

faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır [15]. Bu emisyonların %72'si karayolu taşımacılığından gelmekte; geri kalan kısmı deniz, hava ve demiryolu taşımacılığı oluşturmaktadır. Karayolu ulaştırması, özellikle kent içi düzeyde azot dioksit (NO₂) ve partikül madde (PM_{2.5}) gibi doğrudan solunabilir kirlleticiler açısından halk sağlığı üzerinde doğrudan etkili bir kaynaktır [28].

-Avrupa ve Dünya Genelindeki Durum

Avrupa Çevre Ajansı (EEA) 2022 raporuna göre Avrupa Birliği ülkelerinde ulaşım sektörü:

- i) Toplam CO₂ emisyonlarının %25'ini,
- ii) NO_x emisyonlarının %39'unu,
- iii) PM_{2.5} emisyonlarının %13'ünü üretmektedir [12],[28].

Eurostat verilerine göre, AB (Avrupa Birliği) genelinde kişi başı ulaşım kaynaklı CO₂ salımı 1.860 kg/yıl düzeyindedir. Özellikle Polonya, Almanya, Fransa ve İtalya gibi ülkelerde ağır taşıt trafiği yüksek olduğundan bu değer daha da artmaktadır. Ulaşımın karbondioksit dışı etkileri; ozon oluşum potansiyeli O₃ (Ozon) ve asitlenme potansiyeli SO₂ (Kükürt dioksit)'de küresel ölçekte giderek daha fazla önem kazanmaktadır [28]-[29].

ABD'de ise ulaşım sektörü, 2021 yılı itibariyle enerji kaynaklı emisyonların en büyük kaynağı konumuna gelmiştir. Amerika Çevre Koruma Ajansı'na göre, ulaşım sektörü tüm sera gazı emisyonlarının %29'unu oluşturmaktadır [30].

-Türkiye'de Ulaştırma Emisyonları

Türkiye'de ulaşım sektörü, enerji ve sanayi ile birlikte en yüksek sera gazı emisyonu üreten sektörlerdendir. TÜİK (2022) yılı verilerine göre:

- Toplam sera gazı emisyonlarının %15,8'i ulaştırma sektöründen kaynaklanmaktadır.
- Karayolu taşımacılığı bu oranın %89'luk kısmını oluşturmaktadır.
- Demiryolu, denizyolu ve havayolu taşımacılığı ise çok daha düşük oranlara sahiptir [31].

Özellikle İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa gibi büyükşehirlerde ulaşım kaynaklı hava kirliliği; trafik yoğunluğu, eski araç filosu ve altyapı yetersizlikleri gibi

nedenlerle ciddi boyutlardadır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin İBB (2023) Hava Kalitesi Raporu'na göre:

- D-100 Karayolu ve çevresindeki ölçüm istasyonlarında NO₂ ve PM_{2.5} değerleri yılın %41'inde WHO eşik değerlerini aşmıştır.
- Toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %31'i ulaşımdan kaynaklanmaktadır [24].

Bu veriler, Türkiye'de kentsel ulaşım sistemlerinin sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda yeniden yapılandırılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

-Pandemi Dönemi Emisyon Değişimleri

COVID-19 (Corona Virus Disease) pandemisi sırasında birçok ülkede uygulanan sokağa çıkma kısıtlamaları ve mobilite kısıtlamaları, ulaşımdan kaynaklı emisyonlar üzerinde dramatik bir etki yaratmıştır.

Türkiye'de de İstanbul'da trafik hacmindeki düşüşe bağlı olarak Mart–Mayıs 2020 döneminde PM₁₀ emisyonlarında %18, NO₂ emisyonlarında %32 oranında düşüş gözlemlenmiştir [32]. Bu veriler, ulaşımdan kaynaklanan emisyonların önemli ölçüde insan davranışlarına ve kent içi araç hareketliliğine bağlı olduğunu göstermektedir.

-Politikalar ve Stratejik Hedefler

Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakatı (European Green Deal) çerçevesinde, 2030 yılına kadar ulaştırma sektöründen kaynaklanan emisyonların %55 azaltılması, 2050 itibarıyla ise “net sıfır emisyonlu ulaşım sistemlerine geçilmesi” hedeflenmektedir [26]. Türkiye de 2021'de açıkladığı “İklim Şurası Sonuç Bildirgesi” ve Ulusal Katkı Beyanı (INDC-Intended Nationally Determined Contribution) belgelerinde bu hedeflere uyumlu adımlar atmayı taahhüt etmiştir.

Bu hedeflere ulaşmak için;

1. Elektrikli araç geçişi,
2. Toplu taşımanın yaygınlaştırılması,
3. Mikromobilite sistemleri,
4. Yol bitkilendirme ve yeşil altyapı uygulamaları gibi çözümler

bütünleşik olarak ele alınmaktadır.

2.5. Emisyon Hesaplama Yöntemleri

Ulaşım kaynaklı emisyonların hesaplanması, ulusal sera gazı envanterlerinin oluşturulması, kentsel hava kalitesi yönetimi ve sürdürülebilir ulaşım politikalarının geliştirilmesi açısından kritik bir çalışma alanıdır. Literatürde bu amaçla kullanılan yöntemler genel olarak dört ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bunlar sırasıyla; yakıt tüketimine dayalı yöntemler, aktivite verisine (araç-km) dayalı yöntemler, mikromodel ve dispersiyon modelleri, ekosistem temelli emisyon azaltım modelleridir.

1. Yakıt Tüketimine Dayalı Yöntemler (Tier Sistemleri)

En yaygın kullanılan yaklaşımlardan biri IPCC (2006) tarafından tanımlanan Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 yöntemleridir [1]. Bu sistem, ülkelerin sera gazı envanterlerini standartlaştırmak amacıyla geliştirilmiş olup yakıt verisi veya araç-temelli veri kullanılarak emisyonların tahmin edilmesini sağlar.

-Tier 1 – Yakıt Bazlı Basit Yöntem: Tier 1, toplam yakıt tüketiminin sabit emisyon faktörleriyle çarpılması esasına dayanır [1]. Araç türü, hız profili, yaş veya motor standardı gibi değişkenleri dikkate almadığından, özellikle ilk aşama emisyon envanterlerinde tercih edilir. Avrupa Çevre Ajansı (EEA) ve EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) tarafından hazırlanan EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook'ta tanımlanmıştır [95,96]. Bu yöntem, yakıt tüketim miktarlarını ulusal ya da sektörel düzeyde ele alarak, bu tüketim değerlerini standart emisyon faktörleriyle çarparak emisyon miktarlarını tahmin eder. Tier 1 yöntemi, şehir ya da ülke düzeyinde basit ve uygulanabilir bir emisyon tahmin modelidir. Doğrudan yakıt tüketimi üzerinden çalışır; araç sayısı, hız profili veya yaş grubu gibi detaylara gerek duymaz [1]. Literatürde sıkça kullanılır, özellikle ilk adım analizler ve yerel yönetimlerin temel envanter çalışmaları için uygundur. Genel formül aşağıdadır;

$$\text{Emisyon}_{\text{kirletici}} = \sum (\text{Yakıt Tüketimi} \times \text{Emisyon Faktörü})$$

- a) i = Emisyon türü (CO₂, CO, NO_x, VOC, PM₁₀, PM_{2.5}, vb.),
- b) j = Yakıt türü (benzin, motorin, LPG, CNG, vb.),
- c) Yakıt: Yakıt tüketimi (Terajoule [TJ], litre, kg vb.),
- d) EF: Emisyon faktörü (kg/TJ veya g/litre)

Tablo 2.2 EEA (2019) ve IPCC (2006) tarafından yayımlanmış güncel değerler

Yakıt Türü	CO ₂ EF (Ton/TJ)
Benzin	69,3
Motorin	74,1
LPG	63,1

Tablo 2.2’de yakıt türleri ve bunlara ait ortalama CO₂ tüketim değerleri yer almaktadır [1], [33].

Kullanılan Değişkenler:

- Yakıt Tüketimi; Ülke ya da şehir düzeyinde benzin, motorin, LPG vb. tüketim miktarı (genellikle TJ ya da litre).
- Emisyon Faktörleri (EF); Kirletici başına belirlenmiş sabit değerlerdir.
- CO₂ için: Motorin;74,1 kg/GJ- Benzin; 69,3 kg/GJ, NO_x, VOC, CO ve PM için değerler araç tipi, yakıt ve motor standardına göre değişmektedir.

Ulusal ve uluslararası Ulaştırma Sektörü Emisyonları üzerine yapılan birçok akademik çalışmada, Tier 1 yöntemi başlangıç hesaplamaları için tercih edilmiştir. EEA (2019) rehberinde, Tier 1’in özellikle veri eksikliği olan durumlarda uygulanabilirliği vurgulanmıştır [33].

Tablo 2.3 Dört (4) büyük şehre ait sayısal veriler

Şehir	Nüfus (TÜİK, 2025)	Kayıtlı Motorlu Araç Sayısı	Otomobil Sayısı	1000 Kişi Başına Araç Sayısı	Hava İzleme İstasyonu Sayısı	Trafik Kaynaklı Riskli Bölge Sayısı
İstanbul	15 701 602	5 840 973	3 812 948	371	39	5
Ankara	5 864 049	2 783 571	2 003 310	474	16	2
İzmir	4 493 242	1 954 408	1 014 507	434	23	2
Bursa	3 238 618	1 243 113	671 624	383	8	2

Tablo 2.3’ de dört büyük şehre ait veriler yer almaktadır [34]. Şehirlerin Türkiye toplam araç sayısına oranı: İstanbul $\approx$ %19,86, Ankara $\approx$ %9.29, İzmir $\approx$ %6.43, Bursa $\approx$ %4,07 olarak belirlenmiştir.

Tablo 2.4 Dört Büyükşehir'e Ait Emisyon Değerlerinin Tier 1 Yöntemine Göre Yaklaşık Değerleri (Tier 1 – 2024)

Şehir	CO (ton/yıl)	NO _x (ton/yıl)	VOC (ton/yıl)	PM ₁₀ (ton/yıl)	PM _{2.5} (ton/yıl)	CO ₂ (Mt/yıl)
İstanbul	162 390	21 195	25 245	31,36	16,04	16,9
Ankara	75 930	9 915	11 805	14,67	7,5	7,9
İzmir	52 650	6 880	8 200	10,19	5,21	5,5
Bursa	33 350	4 360	5 200	6,64	3,39	3,5

Tablo 2.4' te yapılan hesaplamalar yalnızca karayolu ulaşımına bağlı doğrudan yakıt kullanım emisyonlarını kapsamaktadır.

$$\text{İstanbul için kişi başı CO}_2: \frac{16900000}{15655000} = 1,08 \text{ ton/kişi/yıl}$$

Türkiye'nin toplam karayolu kaynaklı CO₂ emisyonu $\approx$ 85 Mt/yıl olarak alınmıştır (Eurostat ve EEA). Hesaplamalarda EMEP/EEA Tier 1 ve COPERT 5.5 (Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport) emisyon faktörleri kullanılmıştır Tier 1 yöntemi günümüzde hâlâ yaygın olarak kullanılmakla birlikte, daha hassas ve detaylı emisyon tahminleri yapmak amacıyla geliştirilmiş Tier 2 ve Tier 3 yöntemleri de mevcuttur. Bu yöntemler, EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook (2019 ve sonrası) ile sürekli güncellenmekte, farklı ülke ihtiyaçlarına göre uyarlanabilmektedir [1], [33].

Tier 2 – Araç Türüne Göre Emisyon Faktörleri: Tier 2 yöntemi, yakıt tüketimine ek olarak araç sınıfları, motor teknolojileri ve hız profilleri gibi daha detaylı veriler gerektirir [33].

- Araç tipi (binek, otobüs, kamyonet vb.)
- Yakıt türü (benzin, dizel, LPG)
- Euro emisyon standardı
- Ortalama sürüş mesafesi

$$\text{Emisyon} = \sum (\text{Araç Sayısı Yıllık km} \times \text{EF}_{\text{tip}})$$

Tier 3 – Gelişmiş Model Tabanlı Yaklaşım: Tier 3 yöntemi COPERT gibi ileri modelleme araçlarını kullanır ve gerçek sürüş koşullarını hesaba katar; literatürde en doğru sonuçları veren emisyon tahmin yöntemi olarak kabul edilmektedir.

- Yaş aralığını (0–5 yıl, 5–10 yıl vb.)
- Hız profili ve sürüş döngülerini (şehir içi, dışı)
- Yol tipi (ana arter, tali yol)
- İklimsel koşulları dikkate alır. Bu hesaplamalar genellikle COPERT (Avrupa) veya MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) (ABD) gibi modellere dayanır.

COPERT 5.5 gibi yazılımlar, Tier 3 düzeyinde detay sağlar ve politik etki analizi, trafik senaryoları, yeşil ulaşım politikaları gibi alanlarda kullanılır [33]-[35].

Tier sistemleri bu rehberde açıklanmış ve sektörlere göre özelleştirilmiş ve her 2–3 yılda bir güncellenmektedir.

Yeni sürümlerde öne çıkan güncellemeler:

- Elektrikli ve hibrit araçlar için EF'ler (2016 sonrası)
- Euro 6–7 standartlarının entegrasyonu
- Gerçek sürüş emisyonlarına dayalı EF düzeltmeleri

Tablo 2.5 TIER yöntemleri kullanımları

Kullanım Durumu	Önerilen Yöntem
Ulusal ölçekli, hızlı hesaplama	Tier 1
Şehir düzeyinde, araç dağılımı biliniyorsa	Tier 2
Proje bazlı, senaryo modellemeleri	Tier 3 (COPERT)

2. Aktivite Verisine Dayalı Araç-Kilometre (VKT) Tabanlı Yöntemler

Araç-kilometre VKT (Vehicle Kilometers Traveled) yaklaşımı, belirli bir yol kesitinden geçen araçların toplam katettiği mesafeyi dikkate alır. Bu yaklaşım, mikro ölçekte yol-koridoru analizleri için literatürde sıkça kullanılır [1], [33]-[35].

$$E = \sum(VKT_i \times EF_i) \quad (2.1)$$

Bu yöntem özellikle kavşak, koridor veya belirli bir güzergâh için daha gerçekçi tahminler üretir. EMEP/EEA rehberindeki hız-temelli emisyon katsayılarıyla birlikte kullanılmaktadır [33].

3. Mikromodel ve Dispersiyon Modelleri

Atmosferik kirleticilerin yol kenarı ortamında nasıl yayıldığını belirlemek için literatürde aşağıdaki modellere sıkça başvurulmaktadır:

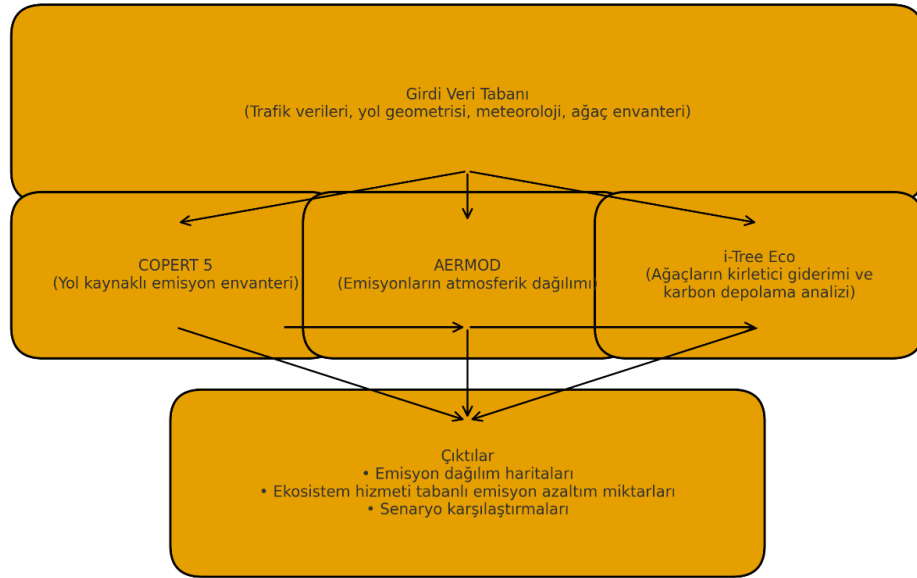
- CALINE-4: Karayolu kaynaklı NO_x, PM ve CO konsantrasyonlarını hesaplamak için kullanılan klasik bir Gauss dağılım modelidir [36].
- AERMOD (Air Quality Dispersion Model): ABD EPA tarafından geliştirilmiş gelişmiş bir dispersiyon modelidir. Endüstriyel tesislerle birlikte yol kaynakları için de kullanılır [37].
- CFD (Computational Fluid Dynamics) Modelleri: Sokak kanyonlarında kirleticilerin dağılımını üç boyutlu olarak modellemek için kullanılır [3].

Bu modeller, özellikle yüksek yapılaşmalı alanlarda rüzgâr tünelleşmesi ve sokak kanyonu etkilerini anlamak için önemlidir.

4. Ekosistem Hizmeti Tabanlı Emisyon Azaltım Modelleri

Ekosistem hizmetleri, kent ekosistemlerinde hava kalitesinin iyileştirilmesi ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda geliştirilen hava kirliliği dağılım modelleri ve biyofiziksel modelleme araçları, kentsel bitkisel örtünün çevresel etkilerinin nicel olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Trafik kaynaklı emisyonların modellenmesinde uzun yıllardır kullanılan CALINE 3 ve CALINE 4 modelleri, özellikle karayolu emisyonlarının yerel ölçekteki dağılımını tahmin etmek için geliştirilmiş deterministik sistemlerdir. Benson (1992), bu modellerin geliştirilme sürecini ve uygulanabilirliğini detaylandırarak, özellikle karayolu kenarı emisyonlarının hesaplanmasında temel başvuru kaynağı haline geldiğini vurgulamıştır [36]. Benzer biçimde, AERMOD modeli, atmosferik dispersiyonun fiziksel temelli bir şekilde değerlendirilmesini sağlayan en yaygın EPA modelidir [38]. Bu model, meteorolojik parametreler ve kaynak özellikleri dikkate alınarak, hava kalitesi üzerindeki etkileri analiz eder. Avrupa ölçeğinde ise COPERT 5 karayolu taşımacılığında kaynaklanan emisyonların ulusal envanter hesaplamaları için standart araç olarak kullanılmaktadır [39]. Model, araç tipi, yakıt türü, hız profili ve trafik hacmi gibi parametreleri kullanarak CO₂, NO_x, PM₁₀ ve PM_{2.5} gibi kirleticilerin tahmini değerlerini üretir. Bu modellerin çıktıları, EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2019) rehberinde belirtilen metodolojik esaslara uygun olarak kullanılmakta ve ulusal sera gazı envanterlerinde yer almaktadır

[33]. Ayrıca, IPCC (2006) tarafından yayımlanan “Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories” dokümanı, emisyon hesaplamalarının uluslararası standartlarını belirlemektedir [1]. Ekosistem tabanlı yaklaşımlar, yalnızca emisyonların hesaplanmasıyla sınırlı kalmayıp, bu emisyonların biyotik faktörler aracılığıyla azaltılmasını da içermektedir. USDA Forest Service tarafından geliştirilen i-Tree Eco modeli, kent ormanlarının hava kirleticilerini tutma, karbon depolama ve oksijen üretimi gibi fonksiyonlarını nicel olarak hesaplamak için kullanılan kapsamlı bir ekosistem hizmeti aracıdır [40]. Nowak ve ark. (2014), ABD’de on şehir üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, ağaçların PM_{2.5} konsantrasyonlarını önemli ölçüde azalttığını ve bu etkinin insan sağlığı üzerindeki olumlu sonuçlarını ortaya koymuştur [4]. Model sonuçları, kent ağaçlarının yıllık bazda tonlarca partikül maddeyi tutabildiğini göstermekte ve bu nedenle kentsel yeşil alanların hava kalitesine katkısının altını çizmektedir. Bu tür biyofiziksel modellerin atmosfer kimyasıyla bütünleştirilmesi, Seinfeld ve Pandis (2016) tarafından açıklandığı üzere, atmosferik kimyasal reaksiyonların ve kirlilik dinamiklerinin daha doğru modellenmesine imkân tanımaktadır [3]. Dolayısıyla, ekosistem hizmetlerinin hava kirliliği azaltımında doğrudan etkili olduğu bilimsel olarak kanıtlanmış durumdadır. Son yıllarda araştırmalar, COPERT–AERMOD–iTree gibi modellerin entegre edilerek “Ekosistem Hizmeti Tabanlı Emisyon Azaltım Modelleri” oluşturulmasına yönelmiştir. Bu entegrasyon, karayolu kaynaklı emisyonların hesaplanması COPERT, atmosferik dağılımın simülasyonu AERMOD ve bitkisel örtülerin emisyon indirgeme kapasitesinin değerlendirilmesi i-Tree süreçlerini bütüncül bir yaklaşımla birleştirir. Bu tür sistemler, EEA ve ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından da desteklenmekte; yerel yönetimlere karbon ayak izi azaltımı, kentsel yeşil altyapı planlaması ve sürdürülebilir ulaşım stratejilerinde bilimsel veri sağlamaktadır [33].



Şekil 2.1 COPERT–AERMOD–i-Tree Eco entegre ekosistem hizmeti tabanlı emisyon azaltım modeli akış diyagramı.

Şekil 2.1’de, çalışmada kullanılan ekosistem hizmeti tabanlı emisyon azaltım modeli şematik olarak gösterilmektedir. Girdi veri tabanında; trafik hacmi ve hız bilgileri, yol geometrisi, meteorolojik parametreler ve ağaç envanteri yer almakta; bu veriler COPERT 5, AERMOD ve i-Tree Eco modellerine eş zamanlı olarak beslenmektedir. COPERT 5, yol kaynaklı emisyon envanterini (CO₂, NO_x, PM_{2.5} vb.) üretmekte; bu emisyon çıktıları AERMOD’a aktarılmakta ve emisyonların atmosferik dağılımı simüle edilmektedir [33], [39], [28]. Elde edilen konsantrasyon alanları ile i-Tree Eco modeline girilen bitkisel örtü parametreleri birleştirilerek, ağaçların kirletici giderimi, karbon depolama kapasitesi ve buna bağlı emisyon azaltım miktarları hesaplanmaktadır [4], [40]. Son aşamada, farklı yeşil altyapı ve ulaşım senaryoları karşılaştırılarak, ekosistem hizmetlerine dayalı emisyon azaltım potansiyeli ortaya konulmaktadır [36], [1], [3].

Tablo 2.6 COPERT'in kullanım amaçları

Amaç	Açıklama
Emisyon Envanteri	Şehir, bölge veya ülke düzeyinde hava kirletici envanteri oluşturmak
Sera Gazı Hesaplamaları	CO ₂ ve diğer GHG'lerin yıllık tahminlerini yapmak
Politika Analizi / Senaryo Üretimi	Alternatif yakıt, ulaşım politikası veya araç teknolojisi senaryoları
Hava Kalitesi Modellemesi	HYSPLIT, CALPUFF gibi modellerle entegre edilerek dağılım analizleri
Yeşil Ulaşım Planlaması	Elektrikli araç geçişi, toplu taşıma teşviki gibi düşük karbon senaryoları

COPERT programının temel kullanım amaçları Tablo 2.6'da ¹açıklamalı olarak verilmiş olup emisyon verilerinin gerçek zamanlı ve nesnel olarak ölçülmesinden önemli bir yer edinmektedir. Tez kapsamında ulaşım kaynaklı emisyonların hesaplanmasında Tier 1 yöntemi tercih edilmiştir. Bunun temel nedenleri, çalışmanın amacı, veri yapısı, kapsamı ve uygulanabilirlik düzeyine dayanmaktadır.

- **Veri Erişilebilirliği ve Tutarlılığı:** Tier 1 yöntemi, detaylı araç sınıflandırmalarına veya sürüş profillerine ihtiyaç duymadan, sadece yakıt tüketimi veya araç sayısı gibi temel verilerle çalışabilme avantajına sahiptir. Bu çalışmada, İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa için resmî kurumlardan temin edilebilen: Toplam motorlu taşıt sayıları, Yakıt tüketim dağılımları (motorin, benzin, LPG), Ulusal düzeyde enerji tüketim istatistikleri gibi veriler kullanılmıştır. Bu veriler, EMEP/EEA kılavuzunda belirtilen Tier 1 hesaplama formatı ile doğrudan uyumludur [33].
- **Uygulama Kolaylığı ve Hızlı Karar Desteği:** Tier 1 yöntemi, özellikle kapsayıcı vebölgesel karşılaştırmalar yapmak isteyen çalışmalar için uygulaması pratik ve anlaşılır bir çözüm sunar. Bu tezde dört büyükşehir karşılaştırmalı olarak analiz edildiğinden, Tier 1 yöntemi ile şehirler arası karbon emisyon eğilimleri hızlı ve net bir şekilde ortaya konmuştur [1], [33].
- **Tezin Kapsam ve Amaçlarıyla Uyumluluk:** Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin büyükşehirlerinde karayolu ulaşımına bağlı emisyonları genel

¹ HYSPLIT, basit hava kütlesi yörüngelerinin yanı sıra karmaşık taşıma, dağılım, kimyasal dönüşüm ve çökelme simülasyonlarını hesaplamak için eksiksiz bir sistemdir. CALPUFF, gelişmiş, kararlı olmayan durumlu bir meteorolojik ve hava kalitesi modelleme sistemidir.

hatlarıyla ortaya koymak ve karşılaştırmalı analizler yapmaktır. Bu amaç doğrultusunda, Tier 1 yöntemi ile: Detaylı modellemeye ihtiyaç duymadan, hızlı, yorumlanabilir ve bilimsel temele dayalı sonuçlar üretilmiştir.

- Daha hassas analizler için Tier 2 ve Tier 3 yöntemleri önerilse de bu yöntemler daha karmaşık araç profili, hız dağılımı, yaş grubu, sürüş döngüsü gibi mikro verilere ihtiyaç duymaktadır [1], [33], [35].
- **Uluslararası Yönergelerle Uyum:** Tier 1 yöntemi, Avrupa Çevre Ajansı EEA ve Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu UNECE tarafından da ulusal envanter çalışmalarında geçerli bir başlangıç seviyesi yöntem olarak tanımlanmıştır [28], [33], [41]-[42]. Bu nedenle, tez çalışmasında kullanılan yöntem, uluslararası kabul gören rehberlerle uyumludur ve akademik geçerliliğe sahiptir.

Bu çalışmada emisyon hesaplamaları için Tier 1 yönteminin seçilmesinin temel nedeni, araştırma alanına ilişkin veri setlerinin sınırlı olması ve detaylı filo, hız profili, araç yaşı ve motor teknolojisi gibi mikro düzeyde verilere erişimde önemli güçlükler bulunmasıdır. D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı özelinde, hem trafik akışına ilişkin ayrıntılı zaman serilerinin hem de araç türü bazlı yakıt tüketim bilgilerinin elde edilmesinin mümkün olmaması, daha detaylı yöntemlerin (Tier 2, Tier 3 veya COPERT modelleri gibi) uygulanabilirliğini sınırlandırmıştır.

Bu çerçevede Tier 1 yöntemi, mevcut veri setleri ile çalışılabilir, uluslararası geçerliliğe sahip ve karayolu kaynaklı toplam emisyon yükünü belirlemede yeterli doğruluk sağlayan bir yaklaşım olarak öne çıkmıştır.

Tablo 2.7 COPERT – Tier 1 karşılaştırması

Kriter	Tier 1 Yöntemi	COPERT Yazılımı
Yöntem Seviyesi	Tier 1 (basit yöntem)	Tier 2 / Tier 3 (detaylı yöntem)
Veri Gereksinimi	Düşük: Yakıt tüketimi veya toplam araç sayısı yeterlidir	Yüksek: Araç tipi, yaş, motor standardı, yıllık km, ortalama hız vb.
Kapsam	Makro (ülke, şehir) düzeyi	Mikro-makro düzey (şehir, bölge, ülke)
Hassasiyet	Düşük (tahmini, genel düzeyde)	Yüksek (araç teknolojisi, hız profili, Euro standardına duyarlı)
Emisyon Faktörleri	Sabit ve ortalama EF değerleri (ör. IPCC, EEA varsayılan değerleri)	Detaylı, hız-bağımlı, Euro sınıfına ve yol tipine göre değişen EF'ler

Çıktılar	Toplam emisyon (ton/yıl, kg/yıl)	Toplam emisyon, g/km, ton/yıl, araç başı emisyonlar vb.
Kirletici Türleri	CO ₂ , CO, NO _x , VOC, PM ₁₀ , PM _{2.5} (bazı kirleticiler sınırlı desteklenir)	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, NO _x , CO, VOC, PM ₁₀ , PM _{2.5} , NH ₃ , SO ₂ ve daha fazlası
Zaman Dinamiği	Statik (yıllık ortalama veriler)	Zaman dinamikli (mevsimsel değişim, yıllık eğilimler modele dahil edilebilir)
Politika Senaryoları	Uygun değil (senaryo analizi için zayıf)	Uygun (elektrikli araç geçişi, toplu taşıma senaryoları vb. analiz edilebilir)
Kullanıcı Profili	Kamu kurumu, belediye, temel akademik araştırma	Ulusal emisyon otoriteleri, iklim uzmanları, ulaşım planlamacıları, akademi
Kullanım Zorluğu	Kolay: Excel, manuel hesaplama ile yapılabilir	Orta-zor: Yazılım kurulumu, veri entegrasyonu ve yorumlama uzmanlık gerektirir
CBS Entegrasyonu	Yok (coğrafi ayrıştırma yapılmaz)	Kısmi: CBS tabanlı yayılım ve senaryo entegrasyonu yapılabilir
Avantajları	Hızlı, basit, düşük veri gereksinimi, genel kıyaslama için uygun	Yüksek doğruluk, politika analizleri ve detaylı modelleme imkânı
Dezavantajları	Düşük hassasiyet, araç teknolojilerine duyarsız	Yüksek veri gereksinimi, kurulum/işletme karmaşık

Tier 1 ve COPERT programlarının karşılaştırmaları Tablo 2.7’de gösterilmiş ve avantajları ile dezavantajları da açıklanmıştır.

Tier 1, ilk aşama tahminler ve veri sınırlı bölgelerde genel eğilim analizi için uygundur. COPERT ise ayrıntılı, senaryoya dayalı, stratejik planlama ve sera gazı raporlama ihtiyaçları için önerilir [33], [35].

2.6. Emisyon Envanterleri, Kılavuz ve Standartlar

Bu tezde, D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı örneğinde kent içi ulaşımdan kaynaklanan emisyonların azaltılmasında yol bitkilendirme stratejilerinin etkinliği değerlendirilmektedir. Bu amaç doğrultusunda, karayolu taşımacılığından kaynaklanan kirleticilerin (CO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, CO ve O₃) nicel olarak hesaplanması, çalışmanın temel dayanaklarından birini oluşturmaktadır.

Ulaşımdan kaynaklı emisyonların bilimsel olarak hesaplanabilmesi ve elde edilen sonuçların uluslararası ölçekte karşılaştırılabilir olması için, emisyon envanteri metodolojilerinin uluslararası kabul görmüş kılavuz ve standartlara dayanması gerekmektedir. Bu bağlamda, tez kapsamında kullanılan Tier 1 yakıt temelli yaklaşım, VKT (araç-km) temelli hesaplamalar ve bitkisel emisyon azaltım modellemesi, IPCC (2006), EMEP/EEA (2019) ve COPERT metodolojisi gibi referans dokümanlarla

uyumlu bir çerçeveye oturtulmuştur [1], [33]. Böylece hem Türkiye'nin ulusal raporlama sistemleriyle tutarlı, hem de AB ve uluslararası literatürle karşılaştırılabilir bir emisyon analiz altyapısı sağlanmıştır.

2.6.1. Ulaşımdan Kaynaklı Emisyon Envanterleri

Ulaşımdan kaynaklanan hava kirleticileri için emisyon envanteri, belirli bir coğrafi bölge ve zaman dilimi için, karayolu, demiryolu, deniz ve hava taşımacılığı kaynaklı emisyon miktarlarının sistematik olarak hesaplanması ve raporlanmasını ifade etmektedir. Bu envanterler:

- Ulusal sera gazı raporlaması,
- Hava kalitesi yönetimi,
- Ulaştırma politikalarının değerlendirilmesi,
- İklim eylem planlarının izlenmesi gibi süreçler için temel veri setini oluşturur [1]-[33].

Karayolu taşımacılığı için emisyon hesaplama yaklaşımları genellikle üç ana grupta ele alınmaktadır:

-Yakıt Tüketimine Dayalı (Tier 1) Emisyon Envanterleri: Toplam yakıt tüketiminin emisyon faktörleriyle çarpılması esasına dayanır. Veri gereksinimi az, hesaplama yapısı görece basittir; ulusal ve bölgesel düzeyde ilk tahminler için uygundur [1].

-Aktivite Verisine Dayalı (VKT, hız profili, araç sınıfı) Envanterler: Araç-km (VKT), araç türü ve hız dağılımına göre emisyon hesaplar. EMEP/EEA ve COPERT metodolojileri bu gruba girmektedir [33], [39].

-Model Tabanlı Envanterler COPERT, MOVES: Geniş veri tabanları ve hız-temelli emisyon fonksiyonları kullanarak detaylı emisyon envanteri üretir; genellikle ulusal resmi envanterlerde kullanılır [33], [37].

Bu tezde, veri kısıtları ve çalışma alanının ölçeği dikkate alınarak, Tier 1 tabanlı yakıt yaklaşımı ve VKT tabanlı kesit hesaplamaları tercih edilmiş; COPERT ve EMEP/EEA rehberleri ise emisyon faktörü seçimi ve metodolojik çerçevenin doğrulanmasında referans olarak kullanılmıştır.

2.6.2. Uluslararası Kılavuz ve Standartlar

Ulaşımdan kaynaklı hava kirleticiler için emisyon envanteri hazırlanırken başvurulana ana kılavuz ve standartlar aşağıdaki başlıklarda toplanabilir.

- **IPCC 2006 (Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories-Ulusal Sera Gazı Envanter Kılavuzları)**

Ülkelerin CO₂, CH₄, N₂O ve diğere sera gazları için ulusal envanter hazırlarken izlemesi gereken standart yöntemleri tanımlar. Enerji sektöründe, özellikle ulaşım kaynaklı CO₂ emisyonlarının hesaplanmasında:

- Tier 1: Yakıt tüketimi × emisyon faktörü
- Tier 2–3: Araç sınıfı, teknoloji ve hız bilgisine dayalı daha detaylı yöntemler önerilmektedir [1].

Tez kapsamında kullanılan yakıt bazlı Tier 1 hesaplamaları, bu kılavuzun enerji/ulaştırma bölümü ile uyumludur.

- **EMEP/EEA 2019 (Emission Inventory Guidebook-Hava Kirleticileri Emisyon Envanteri Kılavuzu)**

Avrupa Çevre Ajansı (EEA) tarafından yayımlanan ve özellikle hava kirleticileri (NO_x, PM, SO₂, VOC, CO) için emisyon envanteri metodolojisini ayrıntılı biçimde açıklayan referans kılavuzdur [33].

Karayolu taşımacılığı için:

- Araç sınıflarına göre (binek, hafif ticari, ağır vasıta),
- Yakıt türüne göre (benzin, dizel, LPG, CNG),
- Euro emisyon standartlarına göre,
- Hız aralıklarına göre ayrıntılı emisyon faktörleri sunulmakta; bu yönüyle hem Tier 1, hem Tier 2, hem de COPERT-benzeri detaylı Tier 3 uygulamalarının temel veri kaynağını oluşturmaktadır.

Tezde kullanılan emisyon katsayıları ve yöntemsel çerçeve, EMEP/EEA (2019) rehberi ile uyumlu olacak biçimde kurgulanmıştır [33].

- **COPERT 5 (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport)**

Avrupa Birliği üyesi ülkelerin ulusal karayolu emisyon envanterini hazırlarken kullandığı standart modeldir [39]. COPERT:

- Hız-temelli emisyon fonksiyonlarına,
- Euro sınıfı ve araç teknolojisi ayırımına,
- Soğuk çalıştırma ve evaporatif emisyon hesaplarına dayalı bir yöntem sunar.

EMEP/EEA rehberi, COPERT metodolojisinin teorik çerçevesini oluşturmaktadır [33]. Bu tezde COPERT doğrudan kullanılmamış, ancak emisyon faktörü seçimi ve yöntemsel karşılaştırmada referans model olarak değerlendirilmiştir.

- **AB Ortam Hava Kalitesi ve Euro Emisyon Standartları**

2008/50/EC sayılı AB Ortam Hava Kalitesi Direktifi, PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO ve O₃ için ortam hava kalitesi sınır değerlerini tanımlar [43]. Bu limitler, emisyon envanter sonuçlarının “yasal sınır değerler” ile kıyaslanmasında kullanılmaktadır. Buna ek olarak, Euro 1–6/7 motorlu araç emisyon standartları, karayolu taşıtlarının egzoz emisyon limitlerini (g/km) belirleyerek, EMEP/EEA ve COPERT modellerinde kullanılan emisyon faktörlerinin temelini oluşturmaktadır [33].

- **WHO Air Quality Guidelines-DSÖ Hava Kalitesi Rehberleri ve US EPA United States Environmental Protection Agency - ABD Çevre Koruma Ajansı**

WHO Hava Kalitesi Rehberleri, PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ ve O₃ için sağlık temelli maruziyet sınırları sunmakta; emisyon envanteri sonuçlarının halk sağlığı etkileri açısından yorumlanmasına olanak tanımaktadır [8]. ABD’de ise US EPA National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) ve AP-42 Emission Factors dokümanları hem ortam hava kalitesi sınırlarını hem de emisyon faktörlerini tanımlayan temel kılavuzlardır [28]. AERMOD ve MOVES gibi araçların metodolojisi de büyük ölçüde bu düzenleyici çerçeveye dayanmaktadır [28].

Bu tezde ulaşımdan kaynaklanan hava kirleticilerin hesaplanmasında:

- IPCC tarafından önerilen Tier 1 yakıt temelli yaklaşım [1],
- EMEP/EEA (2019) kılavuzundaki karayolu emisyon faktörleri [33],
- COPERT metodolojisinin sunduğu araç sınıflandırmaları ve sektör ayrımları dikkate alınarak, veri kısıtlarıyla uyumlu fakat uluslararası standartlarla ilişkili bir emisyon envanteri altyapısı oluşturulmuştur [39].

Böylece D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı için yapılan emisyon hesaplamaları hem Türkiye'nin ulusal raporlama çerçevesiyle hem de Avrupa Birliği'nin ortam hava kalitesi mevzuatı [43] ve IPCC tabanlı yöntemlerle [1] uyumlu ve karşılaştırılabilir bir metodolojik zeminde yürütülmüştür. Bu çerçeve, tezde geliştirilen yol bitkilendirme temelli emisyon azaltım senaryolarının WHO hava kalitesi rehberleri ve AB/uluslararası raporlama sistemleriyle ilişkilendirilerek küresel ölçekte değerlendirilebilmesine imkân sağlamaktadır [8], [43].

2.7. Emisyon Hesaplama Programları

Ulaşım kaynaklı hava kirleticilerinin ve sera gazlarının nicel olarak belirlenmesi amacıyla geliştirilen emisyon hesaplama programları gerek kapsamları gerekse veri gereksinimleri açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Literatürde yer alan modeller genel olarak ulusal ve bölgesel envanter programları, kentsel ve koridor ölçekli emisyon modelleri, atmosferik dispersiyon modelleri ve ekosistem hizmeti temelli bitkisel emisyon azaltım programları şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, farklı ölçeklerdeki çevresel değerlendirmeler açısından çeşitli seçimler oluşturmaktadır.

2.7.1. Ulusal ve Bölgesel Envanter Programlar

Ulusal ve bölgesel envanter programları, sera gazları ile hava kirleticilerinin kaynak bazında hesaplanmasını, raporlanmasını ve zaman içinde değişimlerinin değerlendirilmesini sağlayan sistematik çalışmalardır. Bu nedenle sürdürülebilir çevre yönetiminin ve iklim politikalarının bilimsel dayanağını oluşturan önemli bir araçlardır.

- **COPERT**

Avrupa Çevre Ajansı (EEA) tarafından geliştirilen COPERT, Avrupa Birliği üyesi ülkelerin ulusal karayolu emisyon envanteri hazırlamak amacıyla kullandığı standart modeldir. Program, araçların Euro 1–6 motor teknolojilerine göre ayrıntılı emisyon faktörleri sunmakta; hız-temelli hesaplama yapısı, soğuk çalıştırma ve evaporatif emisyonlar gibi alt bileşenleri de içermektedir [39]. COPERT'in güçlü yönü, kapsamlı veri tabanı ve AB raporlama gereklilikleriyle uyumlu olmasıdır [33].

- **MOVES**

ABD Çevre Koruma Ajansı tarafından geliştirilen MOVES modeli, gerçek sürüş döngüsü, hava sıcaklığı, yakıt bileşimi ve araç kullanım biçimi gibi parametrelere duyarlı bir yapıya sahiptir. Hem federal hem eyalet düzeyindeki emisyon planlamalarında kullanılmakta olup, kapsamlı bir filo veri tabanı içermektedir [37].

- **HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport)**

Almanya, İsviçre ve Avusturya tarafından geliştirilen HBEFA, farklı sürüş modları (kentsel, kırsal, otoyol) için ayrıntılı emisyon faktörleri sunmaktadır. Özellikle Orta Avrupa ülkelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.7.2. Kentsel ve Koridor Ölçekli Emisyon Modelleri

- **VERSIT+**

Hollanda firması olan TNO tarafından geliştirilen VERSIT+, gerçek sürüş davranışına dayanan matematiksel fonksiyonlarıyla şehir içi yönetimde senaryo analizi yapılmasına olanak sağlamaktadır.

- **TRANEM (Transport Emission Model)**

Çok modlu ulaşım sistemlerini (araç, yaya, bisiklet) dikkate alan TRANEM modeli, kentsel ulaşım politikalarının emisyon etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

- **IVE (International Vehicle Emissions Model)**

California Üniversitesi tarafından geliştirilen IVE, gelişmekte olan ülkelerde görülen eski araç filosu ve düşük kaliteli yakıt kullanımını modelleyebilme kapasitesi nedeniyle literatürde öne çıkmaktadır.

2.7.3. Atmosferik Dispersiyon Modelleri

Bu modeller doğrudan emisyon miktarını değil, emisyonların atmosferde nasıl dağıldığını ve hangi koşullarda biriktiğini analiz etmektedir.

- **AERMOD**

US EPA tarafından geliştirilen AERMOD, mikrometeorolojik girdilerle çalışan gelişmiş bir dağılım modelidir ve endüstriyel kaynaklarla birlikte karayolu kaynaklarını da değerlendirebilmektedir [37].

- **CALINE-4**

CALINE-4, Gauss temelli bir çizgisel kaynak modeli olup özellikle yol kenarı CO, NO_x ve PM konsantrasyonlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır [36].

- **CFD (Computational fluid dynamics) Tabanlı Modeller (ANSYS Fluent, OpenFOAM vb.)**

Bu modeller üç boyutlu akış dinamiklerini simüle ederek sokak kanyonu, yol kenarındaki rüzgâr davranışı ve bina etkileri gibi mikro ölçekli değişkenleri analiz edebilmektedir.

2.7.4. Ekosistem Hizmeti Temelli Bitkisel Emisyon Azaltım Programları

- **i-Tree Eco**

USDA Forest Service tarafından geliştirilen i-Tree Eco, ağaç ve çalıların PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂ ve SO₂ gibi kirleticileri tutma ve CO₂ sekestrasyonu yapma kapasitesini hesaplayan kapsamlı bir ekosistem hizmeti modelidir ve hem çevresel hem de ekonomik faydaları nicel olarak ortaya koyması nedeniyle uluslararası literatürde standart bir araç hâline gelmiştir [40].

- **UFORE Modeli**

i-Tree Eco'nun temelini oluşturan UFORE (Urban Forest Effects Model), kent ormanlarının hava kalitesi ve karbon depolama üzerindeki etkilerini değerlendiren ilk nesil modellerden biri olup, güncel i-Tree Eco altyapısının çekirdeğini oluşturmaktadır [40]. Emisyon hesaplama programları, analiz ölçeği ve veri gereksinimleri bakımından birbirinden önemli ölçüde farklılaşmaktadır. Ulusal ölçekli analizlerde COPERT metodolojisi ve EMEP/EEA emisyon envanteri kılavuzu, karayolu taşımacılığına ilişkin ayrıntılı emisyon faktörleri ve sınıflandırmalar sunarak güçlü çözümlemelere olanak vermektedir [33], [39]. Literatürde ayrıca MOVES, VERSIT+ ve IVE gibi programlar da farklı ülke ve kentler için operasyonel esneklik sağlayan araçlar olarak kullanılmaktadır.

Mikro ölçekte, özellikle yol kenarı ve kavşak düzeyinde atmosferik dağılımın değerlendirilmesi gerektiğinde AERMOD ve CALINE-4 gibi modeller, meteorolojik parametreler ve yol geometrisiyle entegrasyon sayesinde yüksek doğrulukla kullanılmaktadır [36], [28]. Doğa tabanlı çözümler kapsamında ise i-Tree Eco modeli, bitkilerin emisyon azaltma kapasitesinin analizi için uluslararası standart niteliğinde

bir araç olarak öne çıkmaktadır [40]. Dolayısıyla her model, ulaşım kaynaklı emisyon analizinde farklı bilimsel gereksinimler ve veri seviyeleri için kendine özgü avantajlar sunmakta; bu tezde önerilen yol bitkilendirme temelli yaklaşımlar da söz konusu model ailesi ile uyumlu bir metodolojik çerçevede kurgulanmaktadır [36], [40].

2.8. Hava Kalitesi İzleme Sistemleri ve Ölçüm Yöntemleri

Hava kalitesinin izlenmesi, kentlerde kirletici yoğunluklarının belirlenmesi, emisyon kaynaklarının tespit edilmesi ve çevre politikalarının oluşturulması açısından temel bir uygulamadır. Özellikle kent içi ulaşım kaynaklı emisyonlar, yerel düzeyde sürekli izleme gerektiren bir problem alanı olup, bu ihtiyacın karşılanması için otomatik istasyonlar, mobil ölçüm sistemleri ve uzaktan algılama teknolojileri kullanılmaktadır. Sabit Ölçüm İstasyonları (Fixed Monitoring Stations), geleneksel sabit istasyonlar, hava kalitesinin güvenilir ve uzun dönemli izlenmesi için temel kaynaklardır. Türkiye genelinde Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 382 sabit istasyon ile 6 temel kirletici parametre (PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_x , CO , O_3) ölçmektedir [89]. İstanbul özelinde ise, İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin ağı hâlen 27 sabit ve 1 mobil istasyonu kapsamakta; meteorolojik verilerle entegre şekilde online saatlik veri akışı sağlanmaktadır [90]

Tablo 2.8 İBB Hava kalitesi izleme istasyonları

İstasyon Adı	İlçe	Kurulum Tarihi	Enlem	Boylam	İstasyon Tipi	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO	NO _x	NO ₂	O ³
Aksaray	Fatih	1998	41°0'51.57"N	28°57'14.19"E	Trafik	X	X	X	X	X	X	X	X
Alibeyköy	Eyüp	1997	41°3'26.56"N	28°56'46.10"E	Konut	X	X	X	X	X	X	X	X
Beşiktaş	Beşiktaş	1998	41°2'23.15"N	29°3'4.05"E	Trafik	X	X	X	X	X	X	X	X
Büyükdada	Adalar	9.10.2013	40°52'57.12"N	29°3'3.46"E	Arkaplan	X							X
Çatladıkapı	Fatih	5.12.2015	41°0'8.26"N	28°58'30.67"E	Trafik	X	X		X	X	X	X	X
Esenler	Esenler	1998	41°1'40.53"N	28°53'13.05"E	Konut	X	X	X	X	X	X	X	
Göztepe	Kadıköy	22.04.2014	40°59'39.53"N	29°4'10.36"E	Trafik	X			X	X	X	X	X
Kadıköy	Kadıköy	1998	40°59'26.33"N	29°9'59.97"E	Konut	X	X	X	X	X	X	X	X
Kağıthane	Kağıthane	23.05.2014	41°4'29.42"N	28°58'15.21"E	Sanayi-konut	X	X	X	X	X	X	X	X
Kandilli	Üsküdar	6.02.2015	41°1'5.91"N	29°3'50.29"E	Şehir Arkaplan	X							X
Kartal	Kartal	1998	40°55'51.61"N	29°11'17.79"E	Konut	X	X	X	X	X	X	X	X
Kilyos	Sarıyer	12.03.2016	41°10'27.06"N	29°2'17.75"E	Kırsal	X	X		X	X	X	X	X
Maslak	Şişli	5.04.2016	41°6'15.64"N	29°8'18.19"E	Şehir Arkaplan	X	X	X		X	X	X	X
Sarıyer	Sarıyer	1998	41°9'40.73"N	29°2'54.79"E	Konut	X	X	X		X	X	X	X
Selimiye	Üsküdar	4.12.2015	41°0'59.39"N	29°3'13.17"E	Trafik	X		X	X	X	X	X	X
Ümraniye	Ümraniye	1997	41°1'5.10"N	29°4'2.74"E	Sanayi-konut	X	X	X		X	X	X	X
Üsküdar	Üsküdar	1998	41°1'9.11"N	29°2'8.97"E	Konut	X	X	X		X	X	X	
Yenibosna	Bahçelievler	1998	40°59'55.55"N	28°49'37.17"E	Konut	X		X	X	X	X	X	

Avcılar	Avcılar	5.04.2016	40°59'10.20"N	28°43'28.98"E	Şehir Arkaplan	X	X	X	X	X	X	X	X
Sultangazi1	Sultangazi	1.04.2017	41°6'53.30"N	28°53'39.34"E	Sanayi-konut	X							
Sultangazi2	Sultangazi	1.04.2017	41°6'53.29"N	28°53'29.81"E	Sanayi-konut	X							
Sultangazi3	Sultangazi	1.04.2017	41°6'53.26"N	28°53'31.96"E	Sanayi-konut	X							
Arnavutköy	Arnavutköy	12.03.2016	41°11'0.65"N	28°43'55.91"E	Kırsal	X	X	X	X	X	X	X	X
Sancaktepe	Sancaktepe	2.10.2019	41°1'13.28"N	29°13'9.4"E	Konut	X		X	X	X	X	X	X
Tuzla	Tuzla	1.03.2018	40°52'0.55"N	29°18'9.6"E	Sanayi-konut	X	X	X	X	X	X	X	X
Bağcılar	Bağcılar	2002	41°2'57.97"N	28°50'34.4"E	Konut	X	X	X	X	X	X	X	X
Beylikdüzü	Beylikdüzü	7.09.2002	41°0'45.91"N	28°12'36.00"E	Konut	X	X			X	X	X	X

Tablo 2.8’de İstanbul iline ait hava kalitesi ölçüm istasyonlarına ait liste yer almakta ve bu istasyonlardan açık erişim olarak veri sağlanabilmektedir [89]-[90].

- **Mobil Ölçüm Sistemleri (Mobile Monitoring Systems)**

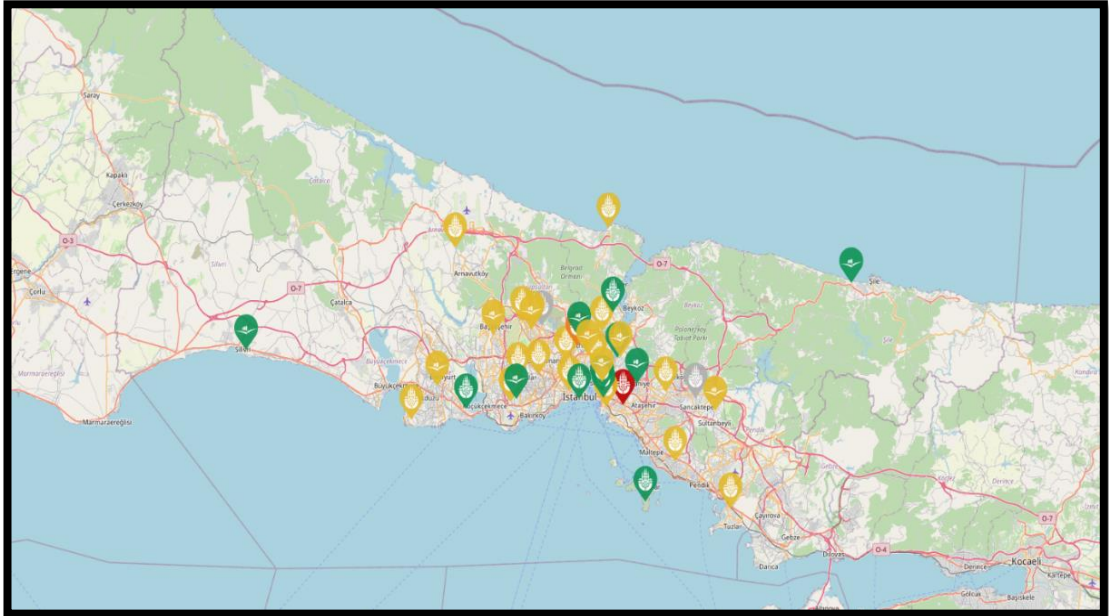
Taşınabilir mobil sistemler, özellikle mekansal yoğunluk ve sıcak noktaları tespit etmekte idealdir: Copernicus benzeri çalışmalarda, sabit referans istasyonlarla karşılaştırıldığında, mobil platformlar durağan ve hareketli ölçümler yoluyla güvenilir veriler sağlamaktadır [91]. Türkiye’de de 4 mobil hava kalitesi ölçüm aracı kullanımı ile şehir genelinde anlık hava kalitesi izlemi yapılmaktadır [92].

- **Pasif ve Aktif Numune Toplayıcılar (Passive and Active Samplers)**

Manuel numune toplama sistemleri, özellikle PM, SO₂, NO₂ gibi kısa süreli, laboratuvar analizlerine yönelik ölçümler için kullanılmaktadır. Mumbai’da 5 noktaya kurulan yeni toz örnekleyici sistemlerle, CAAQMS sabit sistemlerinin veri doğrulamaları yapılmaktadır [93].

- **Uzaktan Algılama ve Uydu Verileri (Remote Sensing & Satellite Data)**

Uzaktan algılama, büyük ölçekli hava kalitesi haritalama ve zengin mekânsal veriler sağlamada öne çıkan bir yaklaşımdır: Javan ve ark. (2025) tarafından yapılan sistematik inceleme, uydu, insanlı ve insansız hava araçları aracılığıyla yüksek çözünürlüklü (sub-kilometreden yakın gerçek zamanlı) hava kirliliği haritaları oluşturulduğunu göstermektedir [94].



Şekil 2.2 İstanbul hava kalitesi izleme istasyonları

Çalışmanın ana materyalini oluşturan D-100 Göztepe Kavşağı ve İstanbulda bulunan diğer hava kalitesi ölçüm istasyonlarına ait konum görüntüleri ve hava kalite durumları Şekil 2.2’de verilmiştir [2].

- **Düşük Maliyetli Sensör Teknolojileri (Low-Cost Sensor Technologies)**

Son yıllarda düşük maliyetli sensörlerin yaygın kullanımıyla izleme ağları hem mekânsal hem zamansal ölçekte ciddi bir dönüşüm yaşamaktadır: Relvas (2025) çalışması, düşük maliyetli sensörlerin (low-cost sensors) hava kirliliği izleme ağlarına entegre edilmesiyle maliyetlerin azaldığını ve daha geniş mekânsal kapsama alanı sağlandığını vurgulamaktadır [95]. Ayrıca vatandaş temelli ölçümler (crowdsensing) sayesinde hava kalitesi değerlendirmelerinde yeni ve yenilikçi yöntemlerin ortaya çıktığı belirtilmektedir [95]. Shahid (2025) ise IoT (Internet of Things) temelli sensörlerin tasarımı, performansı ve uygulama örneklerini analiz etmiş, kalite kontrol ve tehlike senaryolarına dair teknik çözüm önerileri sunmuştur [96]. Ayrıca “Enviro-IoT” sistemi, PM_{2.5}, PM₁₀ ve NO₂ ölçümlerinde %97–98 doğruluk sağlayarak düşük maliyetli sistemlerin referans cihazlara yaklaşabileceğini göstermiştir [97]. Çok daha ileri düzeyde, “Veli” isimli model, yapılandırılmamış öğrenme sistemleriyle düşük maliyetli sensör verilerini referans gerektirmeden düzeltip doğruluğunu artırmaktadır [97].

Tablo 2.9 Ölçüm yöntemlerinin karşılaştırması

Yöntem	Avantajlar	Sınırlamalar
Sabit İstasyonlar	Yüksek doğruluk, süreklilik	Yüksek maliyet, düşük mekânsal çözünürlük
Mobil Sistemler	Esnek kullanım, sıcak nokta tespiti	Kalibrasyon ve veri tutarlılığı sorunları
Pasif/Aktif Örnekleyiciler	Analitik doğruluk, ağır metaller ölçümü	Düşük zaman çözünürlüğü, manuel iş gücü gerektirir
Uzaktan Algılama	Geniş alan kapsama, yüksek çözünürlüklü analiz	Bulut örtüsü, veri işleme gücü gerektirir
Düşük Maliyetli Sensörler	Yaygın ağ, gerçek zamanlı veri imkânı	Veri kalitesinde sapmalar; kalibrasyon zordur

Çalışmanın metodolojilerinden olan ölçüm yöntemlerine ait avantajlar ve sınırlılıkları ile karşılaştırmaları Tablo 2.9’da verilmiştir [94]-[95]-[96]-[97].

2.8.1. Emisyon Dağılım Modelleri ve CBS Entegrasyonu

Kentsel alanlarda hava kirliliği özellikle taşımacılık kaynaklı emisyonların yoğunlaştığı yol koridorlarında kritik düzeylere ulaşabilmektedir. Bu emisyonların yayılım dinamiklerini anlamak, kontrol stratejilerini planlamak ve uygun bitkilendirme uygulamalarıyla etkisini azaltmak için emisyon dağılım modellemesi ve CBS entegrasyonu giderek daha önemli hale gelmiştir [98]-[99]. Emisyon Dağılım Modelleri: Emisyon dağılım modelleri, belirli bir bölgedeki hava kirleticilerin yayılımını hesaplamaya ve tahmin etmeye yönelik deterministik veya istatistiksel araçlardır. En yaygın kullanılan model türleri şunlardır: Gaussian Yayılım Modelleri (AERMOD, CALINE4); yüzey kaynakları ve taşıt trafiğinden salınan kirleticilerin kısa mesafeli yayılımını hesaplar. Yol kenarı konsantrasyonlarına ilişkin detaylı bilgi sağlar. CALINE4, özellikle karayolu emisyonları için tasarlanmıştır. Eulerian / Grid Tabanlı Modeller; bölgesel düzeyde hava kirliliği dağılımını simüle eder. Meteorolojik değişkenlerle entegre çalışır (rüzgâr, sıcaklık, nem). Uygulamaları, ulusal politika simülasyonları, şehir genelinde uzun vadeli planlama. Mikroskobik Simülasyon Tabanlı Modeller (ENVI-met, CFD, i-Tree Eco); bitkilendirme ve yapı morfolojisi gibi fiziksel parametrelerin kentsel mikro ölçekte etkisini analiz eder. ENVI-met, yeşil altyapının PM_{2.5} tutma kapasitesini mahalle düzeyinde simüle eder [98]-[99], [97].

CBS ile Entegrasyon: CBS hava kalitesi ve emisyon verilerinin konumsal boyutunun analiz edilmesi, görselleştirilmesi ve planlama kararlarına entegre edilmesi açısından çok önemli bir araçtır. Özellikle ulaşım kaynaklı emisyonların, yol ağı, yeşil altyapı ve nüfus dağılımı ile değerlendirilmesi, ancak CBS tabanlı analizler aracılığıyla sağlıklı ve bütüncül biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Bu bağlamda, CBS entegrasyonu hem model çıktılarının mekânsal yorumlanmasını kolaylaştırmakta hem de farklı senaryoların planlama ölçeğinde test edilmesine olanak tanımaktadır.

CBS kullanımının çalışmaya sağladığı başlıca katkılar şu şekilde özetlenebilir:

-Yol ağına dayalı emisyon yoğunluk haritalarının üretilmesi: OD matrisi, trafik hacmi ve taşıt türü verileri kullanılarak, hat ve koridor bazında emisyon yoğunluk dağılımlarının çıkarılması ve böylece kritik kirlilik odaklarının belirlenmesi [100]- [101].

-Bitkilendirme senaryolarının mekânsal dağılımının analizi: Tampon zonlar, yol kenarı yeşil bantlar, park ve refüj bitkilendirmeleri gibi unsurların CBS ortamında modellenmesiyle, yeşil altyapı yoğunluğu-emisyon ilişkisi değerlendirilebilmektedir [58].

-Model çıktıların mekânsallaştırma: AERMOD veya benzeri dağılım modellerinden elde edilen konsantrasyon sonuçlarının raster formatta CBS'ye aktarılması, kirletici dağılımının yüzeysel ve zonal analizine imkân tanımaktadır [102].

-Toplu taşıma-emisyon ilişkilerinin incelenmesi: Farklı ulaşım dönüşüm senaryolarında (örneğin özel araçtan toplu taşımaya kayma, tramvay/metro hatlarının güçlendirilmesi) emisyon değişimlerinin, CBS tabanlı analizlerle mekânsal ve zamansal olarak karşılaştırılması mümkün hâle gelmektedir [103].

Bu entegrasyon kapsamında kullanılacak veri setleri ve CBS katmanları, çalışmanın doğruluğu ve detay düzeyi açısından kritik önem taşımaktadır. Gereken başlıca veri türleri şunlardır:

-Trafik verisi: Araç hacmi, ortalama hız, taşıt türü oranları, zirve saatler.

-Yol geometrisi: Yol genişliği, şerit sayısı, eğim, kavşak noktaları, viyadük ve alt geçitler.

-Yeşil altyapı katmanları: Ağaç, çalı, yeşil şerit, park alanı, refüjler; bitki türü, yoğunluğu ve taç örtüsü bilgisiyle birlikte.

-Meteorolojik veriler: Rüzgâr yönü ve hızı, sıcaklık, bağıl nem, karışma yüksekliği gibi parametreler.

-Demografik ve maruziyet verileri: Nüfus yoğunluğu, hassas kullanım alanları (okul, hastane, konut bölgeleri) ve bu alanların emisyon yoğunluk zonlarıyla ilişkisi [103].

Bu yapı sayesinde CBS, tez kapsamında geliştirilen emisyon hesaplama ve bitkilendirme senaryolarının mekânsal geçerliliğinin test edildiği, kritik risk alanlarının belirlendiği ve karar vericilere görsel-anlamsal destek sunan temel bir analitik platform hâline gelmektedir.

2.9. Yol Bitkilendirme Uygulamaları ile Emisyon Azaltımı Çalışma Alanı

Kent içi ulaşım kaynaklı emisyonların azaltılmasında yol bitkilendirme stratejileri, geleneksel mühendislik çözümleriyle birlikte ele alınması gereken çevresel müdahale yöntemlerindendir. Bu bölümde, D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı örneklem alanında yapılan değerlendirmeler, bitkilendirme senaryolarının emisyon azaltımına etkisi, modelleme çıktıları ve karşılaştırmalı analizler sunulmuştur. Mevcut Durum Analizi: D-100 Göztepe Kavşağı İstanbul'un en yoğun trafik akslarından biri olan D-100 Karayolu üzerinde yer alan Göztepe Kavşağı, gün içinde 100.000'in üzerinde araç geçişi ile önemli bir NO₂ ve PM_{2.5} emisyonu kaynağı olarak belirlenmiştir [90].



Şekil 2.3 Göztepe kavşağı uydı görünümü

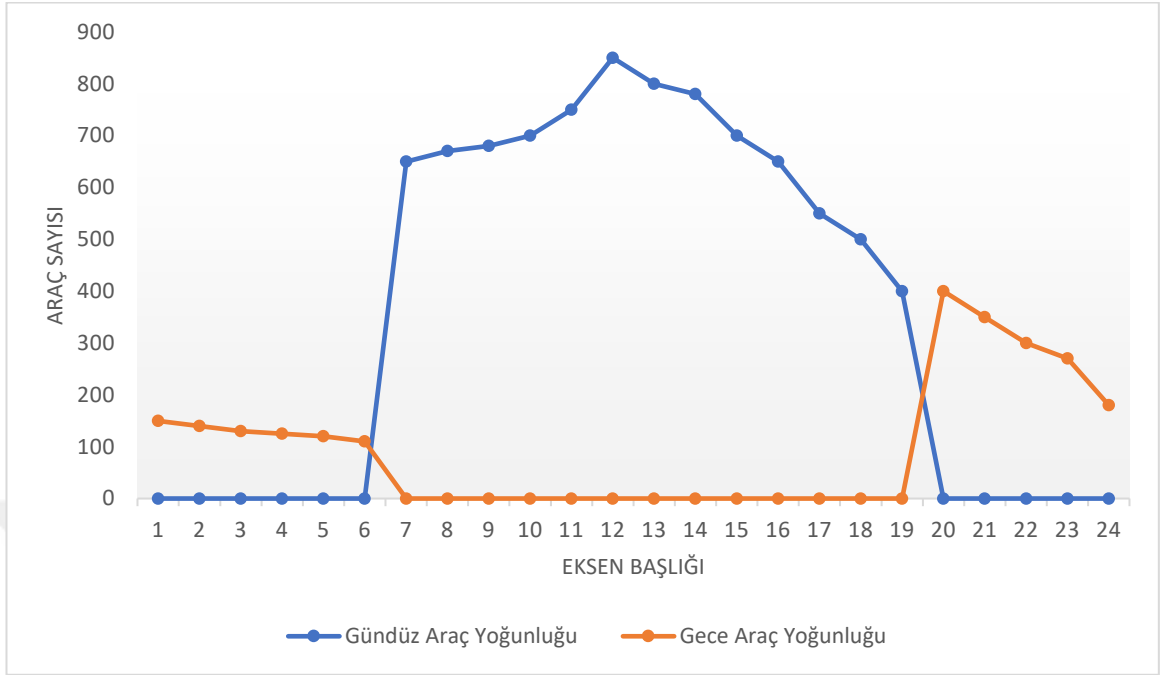
Şekil 2.3'te Çalışma alanına ait uydı görüntüsü bulunmaktadır ve seçilen bölge hem yerleşim hem de trafik bakımından yoğun bir alandır. D-100 Karayolu'nun inşaa süreci oldukça uzun bir geçmişe dayanmaktadır. D-100 Karayolu, 1950'li yıllarda Türkiye'nin ulaşım ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla planlanmış ve inşa edilmeye

başlanmıştır. D-100 Karayolu üzerinde bulunan Göztepe Kavşağı, İstanbul'da Kadıköy ilçesinde yer almaktadır. Bu kavşak, E-5 karayolu ile D-100 karayolunun kesiştiği önemli bir noktadır. Göztepe Kavşağı'nın ana trafik akışı genellikle Kadıköy'e giden ve Kadıköy'den gelen araçların geçişlerini sağlar. Göztepe Kavşağı, genellikle yoğun bir trafik akışına sahiptir. Özellikle iş saatlerinde ve hafta sonları trafiğin daha da yoğun olmaktadır. Kavşak, çevresindeki önemli yerleşim birimleri ve iş merkezleri nedeniyle sürekli olarak kullanılan bir noktadır.



Şekil 2.4 Göztepe kavşağı ve çalışma sahası

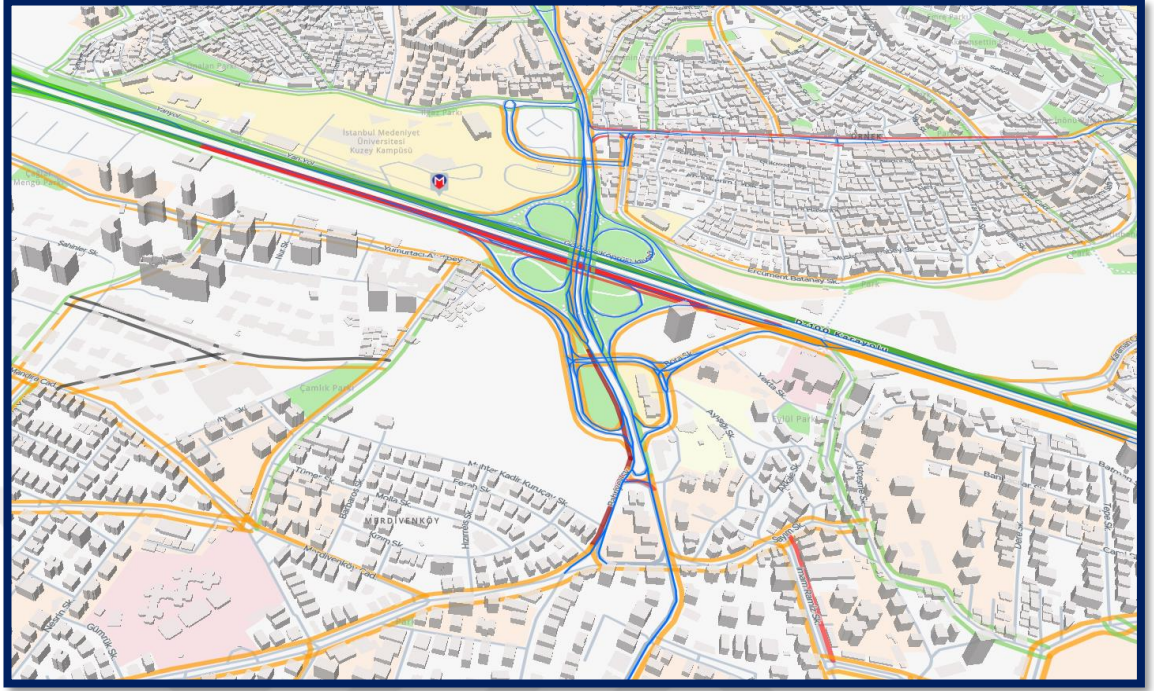
Çalışma alanı Şekil 2.4'te yakın çekim uydu görüntüsü ile gösterilmiş ve topografik yapısı ile mevcut durumu ortaya konmuştur. Trafik yoğunluğu: 07:00–10:00 ve 16:00–20:00 saatleri arası zirve. Araç türü dağılımı: %61 otomobil, %24 hafif ticari, %10 ağır vasıta, %5 motosiklet. PM_{2.5} yıllık ortalama değeri: 32.4 µg/m³ ve NO₂ yıllık ortalama değeri: 49.7 µg/m³ [89]-[90].



Şekil 2.5 Çalışma sahası günlük araç yoğunluğu

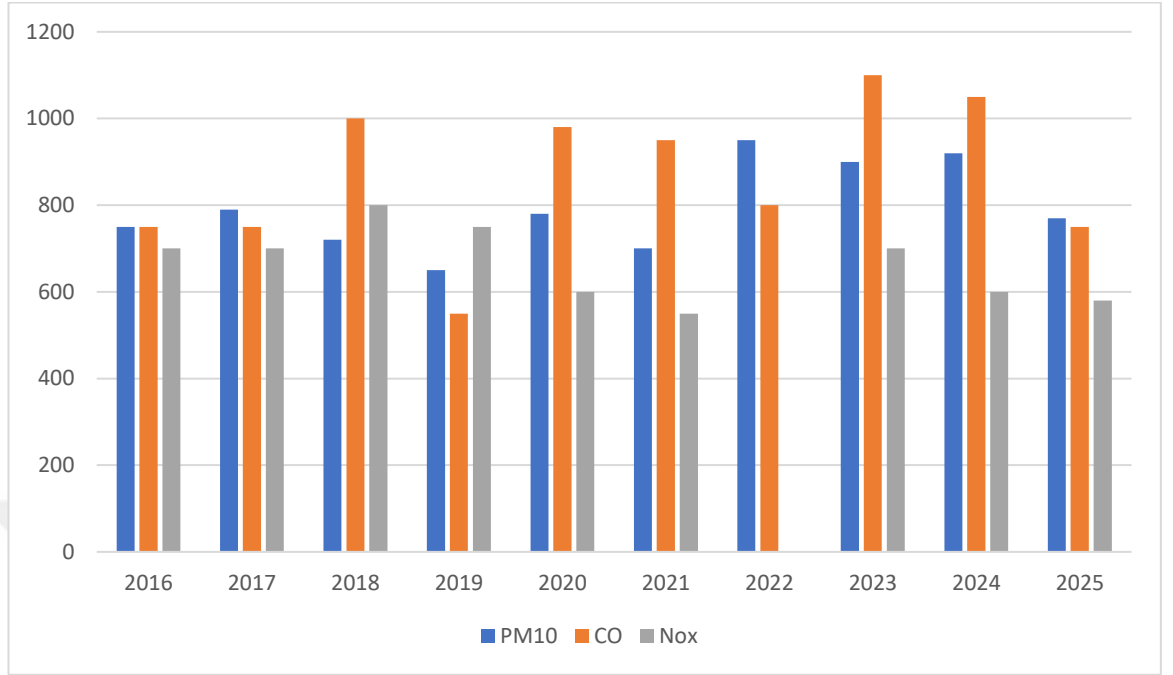
Şekil 2.5’te çalışma alanına ait gece ve gündüz araç yoğunluğuna ait veriler yer almakta olup sabah iş saatleri ve akşam iş çıkış saatlerinde trafik yoğunluğunun saatlik sayıları gösterilmiştir.

D-100 Karayolu üzerindeki Göztepe Kavşağı, İstanbul’un yoğun trafik akışıyla bilinen kritik bir noktasında yer almakta olup, İstanbul Büyükşehir Belediyesi’nin (İBB) hava kalitesi izleme ağı içinde “trafik tipi” istasyon olarak konumlandırılmıştır. Bu istasyon, yol için 9 m yakınlıkta konumlanmakta ve 6 temel hava kirleticisi (PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , O_3 , CO) açısından veri sağlamaktadır [90]. İBB kaynaklarında yer alan verilere göre, bu istasyonda PM_{10} değeri (AQI kategorilerinde “Orta” düzey) olarak belirtilmiştir [90]. Bu durum, hava kirliliğine olağandışı duyarlılık gösteren bireyler için orta düzeyde sağlık endişesi anlamına gelir. Ayrıca, 2023 verilerine göre Göztepe istasyonunda ölçülen PM_{10} ortalama değeri $\sim 40 \mu g/m^3$ olarak belirtilmiş olup, bu değer WHO’nun yıllık PM_{10} kılavuz değerinin ($15 \mu g/m^3$) yaklaşık 2,6 kat üzerindedir [104].



Şekil 2.6 Göztepe kavşağı 3B uydu katmanları ve trafik yoğunluğu

Şekil 2.6’da çalışma alanına ait perspektif 3 boyutlu katmanlar gösterilmiş ve yükselti belirtilmiştir. AQI Değerleri ve Değişim Eğilimleri: 2025 Nisan sonu verilerine göre Göztepe için $PM_{2.5}$ seviyeleri yaklaşık $6 \mu g/m^3$ (AQI: İyi), PM_{10} seviyeleri ise $24 \mu g/m^3$ (AQI: İyi) olarak kaydedilmiştir [105]. Bu ölçümler, özellikle sonbahar ve kış aylarının aksine ilkbaharın temiz hava koşullarını yansıtmaktadır. Buna karşılık, 4–5 Eylül 2025 dönemindeki verilerde Göztepe’nin AQI değeri ortalama 56 (Orta) olarak izlenmiş; bu süreçte $PM_{2.5}$ miktarı $12 \mu g/m^3$, PM_{10} ise $51 \mu g/m^3$ civarındadır [106].



Şekil 2.7 Göztepe kavşağı yıl bazlı emisyon ölçüm değerleri

Şekil 2.7’de Göztepe Kavşağı’na ait 2016-2025 yılları arasında yıllık ortalama emisyon verileri bulunmakta olup değerlerin standart değerlerin üzerinde olduğu görülmektedir [104].

Göztepe’de hava kalitesi, mevsimsel ve günlük zamanlama açısından farklılık göstermektedir. İlkbahar döneminde gözlemlenen düşük PM değerleri olumlu bir tablo sunarken, yaz ya da kış koşullarında orta düzey AQI değerleri dikkat çekmektedir. Göztepe hem trafik kaynaklı kirleticiler açısından hassas bölgeler arasında yer almakta hem de bitkilendirme müdahalelerine açık bir konumda bulunmaktadır. Bu veriler, tez kapsamında önerilen bitkilendirme stratejisinin uygulanabilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle geniş yapraklı ve etkili partikül tutma kapasiteli bitki türlerinin seçimi, yerleşim planlarında hedef bölgenin hava kalitesi performansının iyileştirilmesine katkı sağlayabilir.

3. HAVA KİRLİLİĞİ AZALTIMINA YÖNELİK YÖNTEMLER VE STANDARTLAR

Sanayileşme, kentleşme ve ulaşım yoğunluğu gibi etmenlerle giderek artan hava kirliliği yalnızca çevresel bir sorun değil; aynı zamanda halk sağlığını doğrudan etkileyen küresel bir kriz haline gelmiştir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2021) verilerine göre her yıl yaklaşık 7 milyon erken ölüm, doğrudan veya dolaylı olarak hava kirliliğine bağlı nedenlerden kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, hava kalitesinin izlenmesi, kirletici kaynaklarının kontrol altına alınması ve azaltım politikalarının geliştirilmesi tüm ülkeler için stratejik öncelik hâline gelmiştir [59].

Küresel ölçekte hava kirliliği ile mücadelede temel yaklaşım, kaynaktan azaltım, temiz üretim teknolojileri, emisyon sınırlamaları ve hava kalitesi standartlarının belirlenmesi üzerine kuruludur. AB, ABD ve Japonya gibi gelişmiş ekonomiler, çevre politikalarını uzun yıllardır yürürlükte olan yasal düzenlemeler ve emisyon izinleri, karbon fiyatlandırma mekanizmaları, yeşil altyapı yatırımları gibi stratejilerle desteklemektedir [28]-[30]. Özellikle AB'nin 2008/50/EC sayılı Hava Kalitesi Direktifi, NO₂, O₃, CO, SO₂, PM₁₀ ve PM_{2.5} gibi başlıca kirleticiler için sınır değerleri belirlemiş ve bu değerler üye ülkelere yasal yükümlülük hâline getirilmiştir. Ayrıca “Avrupa Yeşil Mutabakatı” kapsamında 2050 yılına kadar “net sıfır emisyon” hedefi benimsenmiştir [26].

Türkiye’de hava kalitesi yönetimi, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı bünyesindeki Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı tarafından yürütülmekte ve 2008 tarihli “Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği (HKDYY)” ile yasal zemin oluşturulmaktadır. Bu yönetmelik, AB standartlarına uyumlu şekilde NO₂, SO₂, CO, O₃, PM₁₀ ve PM_{2.5} gibi temel kirleticiler için sınır ve hedef değerler ortaya koyar. Ayrıca Temiz Hava Eylem Planları (THEP) kapsamında; büyükşehir belediyeleri ve sanayi bölgelerinde hava kirliliğini azaltmaya yönelik biyofiltreleme (yeşil alan artırımı), araç trafiği düzenlemeleri, ısınma kaynaklı emisyon kontrolü, enerji dönüşümü gibi stratejik eylemler geliştirilmektedir [60].

Geleneksel teknolojik yöntemlerin yanı sıra, son yıllarda doğa tabanlı çözümler (Nature-Based Solutions) de hava kalitesi yönetiminde ön plana çıkmıştır. Özellikle kent içi bitkilendirme, yeşil koridorlar, dikey bahçeler ve yeşil altyapı sistemleri, hava

kirleticilerin pasif olarak filtrelenmesi ve dağılımının kontrolü açısından etkili ve düşük maliyetli çözümler sunmaktadır [17], [6]. Bununla birlikte, bu tür uygulamaların başarıya ulaşabilmesi için; bitki seçiminin bilimsel kriterlere göre yapılması, mekânsal planlamayla uyumlu yerleşim stratejilerinin oluşturulması ve iklim değişikliğiyle bağlantılı senaryoların dikkate alınması gereklidir [23].

3.1. Uluslararası Standartlar ve Politika Belgeleri

Hava kirliliği, sınır aşan bir çevresel tehdit olduğundan, çözümü yalnızca ulusal düzenlemelere değil, uluslararası iş birliklerine, ortak standartlara ve politik uyum süreçlerine dayanmaktadır. Bu bağlamda, başta Birleşmiş Milletler (BM), WHO, AB, OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), UNEP (United Nations Environment Programme), IPCC gibi kuruluşlar tarafından yayımlanan standartlar, strateji belgeleri ve bağlayıcı olmayan rehber ilkeler, ülkelerin kendi hava kalitesi politikalarını şekillendirmelerinde temel rol oynamaktadır [28], [59].

-WHO Hava Kalitesi Kılavuzları: WHO, hava kirliliğini halk sağlığı açısından en önemli çevresel risk faktörlerinden biri olarak tanımlamakta ve üye ülkelere hava kalitesini iyileştirmeye yönelik politika geliştirme sürecinde bilimsel rehberlik sağlamaktadır. WHO'nun ilk hava kalitesi kılavuzu 1987 yılında yayımlanmış olup, bu rehber zamanla gelişen epidemiyolojik bulgular doğrultusunda güncellenmiştir [59].

-Küresel Hava Kalitesi Kılavuzu (2021): En güncel kılavuz olan “Global Air Quality Guidelines – AQG 2021”, 194 ülkede yapılan çok merkezli halk sağlığı çalışmalarına dayalı olarak yayımlanmıştır. Bu belge, özellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde politika yapıcılara önleyici sınır değerler belirleme, kentsel planlamada hava kalitesi entegrasyonu sağlama ve risk bazlı önceliklendirme konularında yön göstermektedir [59].

Tablo 3.1 Kirletici türlerine göre önerilen maruziyet sınır değerleri

Kirletici	Yıllık Ortalama ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Kısa Süreli (24 saat veya 8 saat, mg/m^3)
PM _{2.5}	5	15
PM ₁₀	15	45
NO ₂	10	25
O ₃ (8 saat)	–	100
SO ₂	–	40
CO (24 saat)	–	4

Avrupa çevre ajansının yayınlamış olduğu hava kalitesi kriterlerine ait maruziyet değerleri ve sürleri Tablo 3.1’de gösterilmiş olup aşılması durumunda ciddi sağlık sorunlarına yol açmaktadır [28]. Bu değerler, bağlayıcı yasal normlar değil, ancak “halk sağlığı açısından güvenli eşik” olarak önerilmiştir. Birçok ülke bu değerleri referans alarak kendi ulusal hava kalitesi standartlarını geliştirmiştir [2], [30].

-WHO Kılavuzlarının Bilimsel Temeli: WHO kılavuzları, solunum, kardiyovasküler, nörolojik ve onkolojik etkiler açısından partikül madde, ozon, azot dioksit gibi kirleticilerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini sistematik olarak inceleyen meta-analizlere, kohort çalışmalara ve kentsel morbidite-mortalite analizlerine dayanmaktadır [59]. Bu kılavuzlarda özellikle PM_{2.5} maruziyeti ile inme, iskemik kalp hastalığı, KOAH, akciğer kanseri ve tip-2 diyabet arasındaki güçlü ilişki vurgulanmaktadır. WHO’ya göre, PM_{2.5}’in yıllık ortalama değerinin 5 µg/m³ üzerine çıkması halinde ölüm riski %8, kronik hastalık riski %13 artmaktadır [59]. Bu nedenle PM_{2.5} sınırı daha önceki 10 µg/m³ değerinden 5 µg/m³’e düşürülmüştür. Avrupa Birliği, WHO değerlerini esas alarak 2008/50/EC Hava Kalitesi Direktifi’ni geliştirmiştir. Türkiye, WHO sınır değerlerini “hedef değer” olarak alıp, HKDYY (2008) kapsamında bu değerleri kademeli olarak uygulamayı planlamıştır. Birleşmiş Milletler ve UNEP gibi kuruluşlar, WHO AQG’lerini iklim ve sürdürülebilirlik politikalarının sağlık boyutuna entegre etmektedir [61].

-Avrupa Birliği Hava Kalitesi Standartları: AB, çevresel sağlık risklerini azaltma hedefi doğrultusunda hava kalitesine ilişkin kapsamlı ve bağlayıcı yasal düzenlemeler geliştirmiştir. Bu düzenlemelerin temelini oluşturan 2008/50/EC sayılı “Hava Kalitesi ve Temiz Hava İçin Avrupa Direktifi”, insan sağlığını korumaya yönelik sınır değerler belirlemekte, emisyon kaynaklarının izlenmesini zorunlu kılmakta ve aşım durumlarında politika eylemlerini şart koşmaktadır [26]. AB Direktiflerinin Temel İlkeleri: 2008/50/EC sayılı direktif, aşağıdaki unsurları kapsamaktadır: PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, O₃, CO, SO₂, Pb (Kurşun) ve Ni (Nikel) gibi hava kirleticileri için limit değerler, uzun vadeli hedefler ve maruziyet azaltım yükümlülükleri tanımlar. Üye ülkelerin, hava kalitesini izlemek üzere temsil edici konumlarda ölçüm istasyonları kurmaları ve bu istasyonlardan alınan verileri yıllık olarak EEA iletmeleri gerekir. Sınır değer aşımalarında, Hava Kalitesi İyileştirme Planı (Air Quality Improvement Plan) hazırlama zorunluluğu getirilmiştir.

Tablo 3.2 Başlıca kirleticilere ilişkin sınır değerler

Kirleticisi	Yıllık Ortalama ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Kısa Süreli Limit (24 saat/1 saat/8 saat)	İhlal Koşulu
PM _{2.5}	25	–	Yılda 1 kez aşım
PM ₁₀	40	50 (24 saat)	Yılda 35 gün aşım
NO ₂	40	200 (1 saat)	Yılda 18 kez aşım
O ₃	–	120 (8 saat)	Yılda 25 gün aşım
CO	–	10 mg/m ³ (8 saat)	–
SO ₂	–	125 (24 saat)	Yılda 3 gün aşım

Tablo 3.2’de bazı kirleticilere ait yıllık ortalama değerler ve aşım, ihlal sayıları bildirilmiş olup eşik değerin üstünde olması durumunda zararları sağlık açısından önem arz etmektedir [28]-[30].

-AB Hedef ve Azaltım Yaklaşımları: Avrupa Komisyonu, hava kirliliği kaynaklı yıllık ölüm sayısının 300.000’den fazla [26] olduğunu vurgulayarak 2022 yılında yeni bir strateji yayımlamıştır: “Sıfır Kirlilik Eylem Planı” (Zero Pollution Action Plan): 2030 yılına kadar hava kirliliğinden kaynaklanan ölümlerin %55 oranında azaltılması hedeflenmiştir [26]. AB ülkelerinde, 2024 yılı itibarıyla PM_{2.5} için yeni yıllık ortalama hedef değeri 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak önerilmiş ve WHO kılavuzlarıyla daha fazla uyum amaçlanmıştır [8], [20]. Türkiye’nin AB Uyum Süreci ve Mevzuat Dönüşümü: Türkiye, aday ülke statüsüyle Çevre Faslı (27. Fasıl) kapsamında AB hava kalitesi mevzuatını ulusal sistemine entegre etmektedir. Bu doğrultuda; 2008 yılında yayımlanan HKDYY, AB’nin 2008/50/EC direktifiyle büyük ölçüde paralel hâle getirilmiştir. PM_{2.5} için Türkiye’nin 2024 yılına kadar yıllık sınır değeri 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2029 yılı itibarıyla ise 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ olacak şekilde kademeli geçiş planlanmıştır. Ulusal hava kalitesi izleme ağı (UHKİA), AB kriterlerine göre kurulan 300’den fazla sabit istasyonla güncellenmiştir [60].

Bu süreçte AB’nin teknik yardım programları IPA (Instrument for Pre-Accession Assistance) projeleri, ölçüm altyapısının geliştirilmesi, modelleme kapasitesinin artırılması ve yerel yönetimlerin THEP hazırlama kapasitesinin desteklenmesi açısından önemli katkılar sunmuştur.

-Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA): Birleşmiş Milletler tarafından 2015 yılında ilan edilen ve 2030 yılına kadar evrensel olarak benimsenmesi hedeflenen Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (Sustainable Development Goals, SDG), çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutları içeren bütüncül

bir kalkınma yaklaşımını temsil etmektedir. Bu amaçlar, iklim değişikliğiyle mücadele, sağlıklı yaşamın teşviki, sürdürülebilir kentleşme ve çevresel kaynakların korunması gibi hedeflerle doğrudan bağlantılıdır. Bu doğrultuda, bu tez kapsamında önerilen yol kenarı bitkilendirme stratejileri ve hava kalitesi odaklı bitki türü seçimi modeli, birçok SKA hedefiyle yapısal olarak ilişkilendirilmektedir.

-SKA 3 – Sağlıklı Bireyler (Good Health and Well-being): Hava kirliliği, Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre yılda yaklaşık 7 milyon erken ölüme neden olmaktadır. Ulaşım kaynaklı emisyonların azaltılması, solunum yolu hastalıklarının ve kardiyovasküler etkilerin önüne geçilmesinde önemli rol oynar. Tez kapsamında geliştirilen bitkilendirme modeli, PM_{2.5} ve NO_x gibi kirleticilerin azaltımına katkı sunarak halk sağlığını korumaya yönelik bir çözüm üretmektedir.

-SKA 11 – Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar (Sustainable Cities and Communities): Kentlerde yeşil altyapının güçlendirilmesi; iklim adaptasyonu, kent estetiği, sosyal yaşam kalitesi ve ulaşım sistemlerinin bütüncül planlaması için kritik önemdedir. Bitki seçimi modeli, özellikle mikro ölçekte sürdürülebilir ulaşım koridorları ve yeşil tampon bölgelerin oluşturulmasını teşvik ederek, bu hedefin alt bileşenlerine doğrudan katkı sağlamaktadır.

-SKA 13 – İklim Eylemi (Climate Action): Ulaşım sektörü, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %24'ünü oluşturmaktadır. Bu çalışma, yol kenarı bitkilendirmesi aracılığıyla karbon sekestrasyonu, ısı adası etkisinin azaltılması ve emisyon dengelemesi gibi mekanizmalarla iklim değişikliğiyle mücadelede doğrudan yer almaktadır.

-SKA 15 – Karasal Yaşam (Life on Land): Kent içindeki bitkilendirme faaliyetleri, biyoçeşitlilik açısından habitat sağlamakta; arı, kuş, kelebek gibi türlerin yaşam alanlarını desteklemektedir. Doğru bitki türü seçimi, kent peyzajında sadece işlevsel değil; aynı zamanda ekolojik bütünlük sağlayıcı bir unsur olarak da değerlendirilmektedir.

-SKA 17 – Amaçlar İçin Ortaklıklar (Partnerships for the Goals): Tez sürecinde farklı disiplinlerden uzmanlarla (şehir plancıları, çevre mühendisleri, peyzaj mimarları) iş birliği yapılması; yerel yönetim, akademi ve STK'lar ile veri paylaşımı ve modelleme süreçlerinin birlikte yürütülmesi, SKA 17 çerçevesinde çok paydaşlı yönetim anlayışını desteklemektedir.

-SKA'ların Uygulamada Rolü ve Gözetimi: UN-Habitat, UNEP ve World Bank gibi kuruluşlar SKA'ların şehir düzeyinde izlenmesi için “Sürdürülebilir Şehir Göstergeleri” geliştirmiştir. PM_{2.5} yıllık ortalaması, SKA 11 için belirlenmiş resmi göstergedir. Ülkeler, SKA uygulamalarını Gönüllü Ulusal Gözden Geçirme VNR (Voluntary National Review) raporları ile BM'ye sunar. Türkiye de 2019 ve 2023 yıllarında VNR sunumlarında hava kalitesi iyileştirme hedeflerine yer vermiştir [62].

-UNECE Hava Kirliliği ile Mücadele Anlaşmaları: Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (UNECE), Avrupa, Orta Asya ve Kuzey Amerika ülkelerini kapsayan bölgesel bir yapı olarak, çevresel iş birliklerini desteklemek amacıyla çeşitli çevre sözleşmeleri geliştirmiştir. Bu sözleşmelerden en kapsamlı ve etkili olanı, "Sınır Aşan Hava Kirliliği ile Uzun Menzilli Mücadele Sözleşmesi CLRTAP (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution)"dir. CLRTAP (1979) Sınır Aşan Hava Kirliliği Sözleşmesi: 1979 yılında İsveç'in Göteborg kentinde imzalanmış ve 1983 yılında yürürlüğe girmiştir. Sözleşmenin temel amacı; hava kirleticilerin, özellikle asitleşme, ozon oluşumu, eutrofikasyon, orman hasarı gibi etkilerinin sınır ötesi taşınmasını sınırlamak ve taraf devletler arasında teknik ve bilimsel iş birliğini güçlendirmektir [41]. Bugün itibarıyla 51 ülke tarafından onaylanan bu sözleşme, bir çerçeve anlaşma niteliği taşıyıp, zamanla 8 adet protokolle zenginleştirilmiştir.

Başlıca CLRTAP Protokolleri:

- 1985 Helsinki Protokolü (SO₂ Azaltımı)
 - ✓ Sülfür dioksit (SO₂) emisyonlarının 1993 yılına kadar %30 azaltılmasını hedeflemiştir.
 - ✓ Asitleşme, orman ölümü ve ekosistem tahribatına karşı ilk kapsamlı bölgesel protokoldür.
- 1988 Nitrojene Dayalı Bileşikler Protokolü
 - ✓ Azot oksit (NO_x) emisyonlarının 1994'e kadar %30 azaltılması hedeflenmiştir.
 - ✓ NO_x hem asitleşme hem de ozon oluşumunda kritik rol oynar.
- 1999 Göteborg Protokolü
 - ✓ “Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone” (AEG) olarak adlandırılan üçlü soruna karşı geliştirilmiştir.

- ✓ Protokol, SO₂, NO_x, NH₃ ve VOC emisyonlarını aynı anda azaltmayı hedefleyen ilk çok taraflı anlaşmadır.
- ✓ 2012 yılında revize edilerek ince partikül madde (PM_{2.5}) de protokol kapsamına alınmış ve Black Carbon (Karbon Siyahı) gibi kısa ömürlü iklim kirleticileri de dahil edilmiştir [42].

Tablo 3.3 Kirleticiler ve hedef azaltımları

Kirletici	Hedef Azaltım (%)	Kapsam
SO ₂	63	Sanayi, enerji
NO _x	41	Ulaşım
NH ₃	17	Tarım
VOC	40	Endüstri
PM _{2.5}	22	Isınma, ulaşım

UNECE (2023) hedefleri Tablo 3.3'te verilmiş olup çerçeve sözleşmelerde detayları açıklanmıştır [42].

UNECE ve Türkiye: Türkiye, CLRTAP sözleşmesini 1985 yılında imzalamış ancak 2023 itibarıyla görevli protokollerin çoğuna taraf değildir. Ancak AB'ye uyum süreci kapsamında; PM_{2.5} ve SO₂ emisyonları için modelleme ve azaltım stratejileri, ulaşım ve sanayi kaynaklı NO_x emisyonlarına ilişkin izleme çalışmaları, Göteborg Protokolü'ne taraf olma hazırlıkları gibi adımlar atılmıştır (T.C. ÇŞİDB, 2021).[60]-[62]. Türkiye'nin taraf olmaması, sınır aşan kirleticilerle mücadelede bölgesel koordinasyon eksikliğine neden olmaktadır. Bu bağlamda, UNECE protokollerine uyum, hava kirliliğinin uluslararası yönünün yönetimi açısından stratejik öneme sahiptir.

3.2. Avrupa Birliği ve ABD Uygulamaları

Dünyanın önde gelen ekonomik ve politik aktörlerinden olan AB ve ABD, hava kalitesinin korunması ve iyileştirilmesi konusunda mevzuat düzeyinde katı, uygulama açısından kapsamlı ve bilimsel veriye dayalı stratejiler izlemektedir. Her iki sistemde de halk sağlığı öncelikli olmakla birlikte, politikaların yapısal tasarımında ve uygulama araçlarında önemli farklar gözlemlenir [28]-[30].

- **Avrupa Birliği Uygulamaları**

AB'nin hava kalitesi politikaları, 2008/50/EC sayılı Hava Kalitesi Direktifi temelinde yürütölmektedir. Direktif, belirlenen sınır değėrlerin aşılmaması durumunda üye devletlerin Hava Kalitesi Planları (Air Quality Plans) hazırlamasını ve bilgilendirme eşiklerinin altında kalma yükümlölüğünü esas alır [26].

- Uygulama Araçları:

- ✓ AB LIFE Programı: Hava kalitesi projeleri için finansman kaynağı.
- ✓ Uygulama Raporlaması (e-Reporting): Üye ölkeler, Avrupa Çevre Ajansı'na (EEA) yıllık veri gönderir.
- ✓ Urbact ve Covenant of Mayors: Yerel yönetimlerin hava kirliliğini azaltmaya dönük stratejik ortaklık ağları.

- Örnek Uygulamalar:

- ✓ Almanya: Berlin'de "Umweltzone" adı verilen düşük emisyon bölgeleri.
- ✓ Fransa: Paris'te "Crit'Air" araç etiketleme sistemi.
- ✓ İspanya: Madrid Central projesi ile içten yanmalı motorların merkezde yasaklanması.

AB ölkelerinde yeşil altyapı kullanımı da teşvik edilmekte, özellikle dikey bahçeler, yeşil çatı uygulamaları ve yol kenarı bitkilendirme ile partiköl madde kontrolü sağlanmaktadır [23].

- **ABD Uygulamaları**

ABD'de hava kalitesi politikaları 1970 tarihli Clean Air Act (CAA) ve onunla ilişkili National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) ile yürütölmektedir. CAA, federal düzeyde bağlayıcı olup, her eyaletin kendi uyum planlarını (State Implementation Plans – SIPs) hazırlamasını öngörür [30].

- Uygulama Araçları:

- ✓ AirNow sistemi: Gerçek zamanlı hava kalitesi izleme ve kamuya açık veri paylaşımı.
- ✓ Emission Offset Policy: Sanayi yatırımlarında "kirlilik hakkı" kullanımı.

- ✓ Vehicle Emission Control: Kaliforniya gibi eyaletlerde daha sıkı egzoz denetimi ve elektrikli araç teşviki.
- Örnek Uygulamalar:
 - ✓ New York: Otobüs filolarının CNG ve elektrikli araçlara dönüştürülmesi.
 - ✓ Los Angeles: 1990'lardan bu yana PM ve ozon azaltımı için geniş kapsamlı bölgesel hava kalitesi planları.
 - ✓ Chicago: Yeşil çatı uygulamaları ve ağaçlandırma politikalarıyla sıcaklık ve PM kontrolü.

ABD'de ayrıca, EPA destekli projeler kapsamında şehir bazlı mikrosensör izleme sistemleri, mobil hava kalitesi istasyonları ve sosyal eşitsizlik boyutuyla hava kalitesi adaleti gibi çok disiplinli yaklaşımlar da gelişmektedir [6].

Tablo 3.4 Avrupa ve ABD karşılaştırmalı değerlendirme

Kriter	Avrupa Birliği	Amerika Birleşik Devletleri
Yasal Dayanak	2008/50/EC Direktifi	Clean Air Act (1970)
Yönetişim Modeli	Ortak kurallar – Ulusal uygulama	Federal standart – Eyalet uyum planı
Emisyon Kontrol Aracı	Sınır değerler, eylem planları	NAAQS, SIPs, offset mekanizmaları
Finansal Destek	LIFE, Horizon Europe	EPA hibeleri, Clean School Bus Program
Kamu Katılımı	Belediye birlikleri, AB gözlemleri	AirNow sistemi, eyalet bazlı portallar
Yeşil Altyapı ve NBS	Dikey bahçeler, yeşil koridorlar	Ağaçlandırma, çatı bahçeleri

Tablo 3.4'de ABD ve Avrupa Birliğinin çevreye uyum sürecinde ve emisyonların azaltılması kapsamında almış olduğu önlemler ve uygulamalar karşılaştırmalı olarak verilmiştir [6], [9], [12].

3.3. Türkiye'de Yasal Düzenlemeler ve Politikalar

Türkiye'de hava kalitesinin korunmasına ilişkin yasal ve yönetsel çerçeve, Çevre Kanunu (1983) başta olmak üzere, çeşitli yönetmelikler, strateji belgeleri ve uluslararası yükümlülükler doğrultusunda şekillenmiştir. Son yıllarda AB mevzuatına uyum, iklim değişikliğiyle eşgüdüm ve temiz hava eylem planları gibi politik araçlar öne çıkmaktadır.

Yasal Temel: Çevre Kanunu ve İkincil Mevzuat:

- 2872 Sayılı Çevre Kanunu (1983)

Türkiye'nin çevre yönetimine ilişkin temel kanunudur.

- ✓ Madde 8: Çevreyi kirletmeme yükümlülüğü
- ✓ Madde 12: Hava kalitesi izleme ve raporlama zorunluluğu
- Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği (HKDYY, 2008)
 - ✓ AB'nin 2008/50/EC sayılı direktifi esas alınarak hazırlanmıştır.
 - ✓ PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, O₃, SO₂ gibi kirleticiler için sınır ve hedef değerler belirlenmiştir.
 - ✓ Türkiye, PM_{2.5} için kademeli geçiş süreci uygulamaktadır:
 1. 2024: 25 µg/m³
 2. 2029: 20 µg/m³ hedefi
- Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY, 2009)
 - ✓ Yakma tesisleri ve sanayi kaynaklı emisyonların sınırlandırılması, filtre ve baca sistemlerinin standardizasyonu.

Kurumsal Yapı ve İzleme Sistemleri

- ✓ T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB), merkezi otoritedir.
- ✓ Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA) ile 350+ istasyon üzerinden PM, NO₂, O₃, CO, SO₂ gibi parametreler ölçülmektedir.
- ✓ Ölçüm verileri www.havaizleme.gov.tr adresinden anlık erişilebilir durumdadır.

Stratejik Belgeler ve Eylem Planları

- *Ulusal Temiz Hava Eylem Planı (THEP, 2020–2025)*
 - ✓ 31 il için özel eylem planları hazırlanmıştır.
 - ✓ Hedefler arasında:
 - i. Toplu taşıma teşviki
 - ii. Bitkilendirme ile biyofiltrasyon
 - iii. Konutlarda yakıt dönüşümü
 - iv. Endüstriyel dönüşüm
- *Ulusal Hava Kalitesi Stratejisi (2021 Taslağı)*
 - ✓ Göteborg Protokolü'ne hazırlık
 - ✓ Kentsel sıcaklık adalarının azaltılması
 - ✓ Yeşil altyapının yaygınlaştırılması

Avrupa Birliği Uyum Süreci ve Teknik Yardım

Türkiye, AB Çevre Faslı (Fasıl 27) kapsamında hava kalitesi konularında çeşitli IPA projeleriyle teknik destek almıştır. Bu kapsamda:

- ✓ Entegre hava modelleme sistemleri kurulmuştur (CAMx, AERMOD).
- ✓ Hava kalitesi yönetim planları hazırlanmıştır (İzmir, Ankara, Bursa gibi pilot illerde).
- ✓ AB sınır değerlerine uyum takvimleri düzenlenmiştir.
- ✓ Son yıllarda hava kalitesi politikaları doğa temelli çözümlerle (Nature-Based Solutions) desteklenmektedir.

Yol kenarı ağaçlandırmaları, yeşil koridorlar ve kent ormanları, hava kalitesinin iyileştirilmesi için pasif filtre sistemleri olarak planlanmaktadır. THEP belgelerinde, şehir içi bitkilendirme çalışmalarına doğrudan yer verilmiştir.

Türkiye Büyükşehirlerinde Uygulamalar ve Hava Kalitesi Göstergeleri: Türkiye’de hava kirliliği, özellikle sanayi, ısınma ve ulaşım kaynaklı emisyonların yoğunlaştığı büyükşehirlerde çevresel, sosyal ve sağlık temelli bir kriz hâline gelmiştir. PM₁₀ ve PM_{2.5} başta olmak üzere solunabilir partikül maddeler, Türkiye'nin pek çok kentinde WHO ve AB sınırlarının üzerinde seyretmektedir. Bu bağlamda büyükşehir belediyeleri, yerel hava kalitesi iyileştirme stratejileri geliştirerek hem kent sağlığını hem de sürdürülebilir kentleşmeyi önceleyen adımlar atmaktadır [28], [62].

Tablo 3.5 Hava Kalitesi Göstergeleri (PM_{2.5} – PM₁₀ – NO₂) Türkiye geneli 2025 ortalamaları

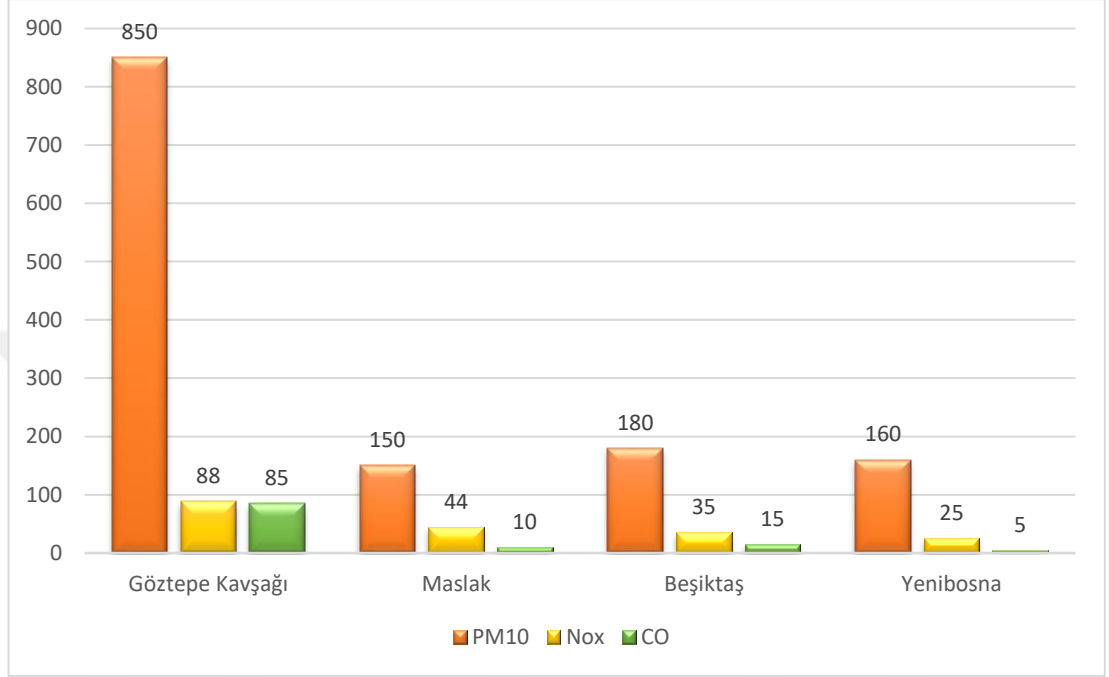
Kirletici	WHO Sınır Değeri (Yıllık)	Türkiye Büyükşehir Ortalaması	AB Limitine Uygunluk
PM _{2.5}	5 µg/m ³	20–40 µg/m ³ arasında	Hayır
PM ₁₀	15 µg/m ³	30–60 µg/m ³ arasında	Hayır
NO ₂	10 µg/m ³	20–50 µg/m ³ arasında	Hayır

Türkiye şehirlerinin hava kalitelerinin yıllık ortalamasına ait ölçüm değerleri Tablo 3.5’te gösterilmekte ve AB limitlerinin çok üstünde seyretmektedir [60].

• İstanbul

Yoğunluk, Toplu Taşıma ve Emisyon Yönetimi: Türkiye’nin en kalabalık metropolü olan İstanbul, yaklaşık 16 milyonluk nüfusu, 5 milyonu aşan motorlu araç stoku ve karmaşık ulaşım ağıyla ülkenin en yüksek hava kirliliği baskısını yaşayan kentidir. İstanbul’da hava kirliliğinin temel kaynakları arasında karayolu taşımacılığı,

ısıtma, inşaat faaliyetleri ve deniz trafiği yer alırken, egzoz kaynaklı NO₂, PM_{2.5} ve O₃ düzeyleri yıl boyunca özellikle şehir merkezlerinde sınır değerleri aşmaktadır [63].



Şekil 3.1 İstanbul trafik emisyon ölçüm istasyonlarının günlük ortalama değerlerinin karşılaştırmalı PM10, NOx, CO karşılaştırması

Şekil 3.1’de İstanbul iline bağlı önemli noktalarda, trafik emisyon ölçüm istasyonlarının bulunduğu; karşılaştırmalı olarak günlük ortalama emisyon değer verileri işlenmiştir.

Nüfus ve Ulaşım Yoğunluğu; İstanbul’da 2023 yılı itibarıyla kişi başı günlük ortalama ulaşım hareketliliği 2.8 yolculuk olup, bunun %80’i karayolu kaynaklıdır [24]. Toplam 5 milyonun üzerinde araç kayıtlıdır; bunun %73’ü bireysel otomobildir [34]. İstanbul, Türkiye’de NO₂ kirliliği açısından en yoğun il olup; 2023 yıllık ortalaması 43 µg/m³ ile WHO (10 µg/m³) ve AB (40 µg/m³) sınırlarını aşmıştır [63].

➤ Toplu Taşıma Altyapısı ve Dönüşüm Stratejileri;

a) Otobüs Filosu ve Enerji Dönüşümü

- I. İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB), 2020 sonrası yeni dizel otobüs alımını durdurmuş ve CNG (Sıkıştırılmış Doğalgaz) ve elektrikli araçlara geçiş sürecini başlatmıştır.
- II. 2023 itibarıyla 60’tan fazla elektrikli otobüs faaliyettedir.

- III. Metrobüs hattı, günde 1 milyonun üzerinde yolcu taşımakta ve bireysel taşıt kullanımını sınırlandıran etkili bir sistemdir.

b) *Raylı Sistemler*

- I. Mevcut metro uzunluğu ~325 km'dir (2023).
II. Hedef: 2029 itibarıyla 650 km'ye ulaşmak.
III. Metro hatları, özellikle PM ve CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır [93].

c) *Mikromobilite ve Bisiklet Teşvikleri*

1. Martı, BinBin, HOP gibi e-scooter sistemleri desteklenmekte ve İBB tarafından düzenlenmektedir.
2. İstanbul'da aktif bisiklet yolu uzunluğu 160 km'ye ulaşmıştır.
3. Trafikteki kısa mesafe yolculuklarda mikromobilite kullanımı %12'ye ulaşmıştır [24].

Emisyon Yönetimi ve Hava Kalitesi İzleme; İstanbul'da 17 farklı noktada sabit hava kalitesi izleme istasyonu bulunmaktadır (Pendik, Kağıthane, Beşiktaş, Üsküdar vb.). PM_{2.5} yıllık ortalaması 26–35 µg/m³ aralığında olup WHO sınırının 5 katına kadar çıkabilmektedir [106]. NO₂ yıllık ortalaması 40–45 µg/m³ ile WHO ve AB limitlerini aşmıştır [63]. Yeşil Altyapı ile Emisyon Azaltımı; 2020–2023 arasında kent genelinde 1,5 milyon m² yeni yeşil alan kazandırılmıştır [24], [32]. Yol kenarı ağaçlandırmalarında *Platanus orientalis*, *Tilia tomentosa*, *Cedrus libani* gibi türler tercih edilmektedir. “Yeşil İstanbul Eylem Planı” kapsamında 2024'e kadar 100.000 yeni ağaç hedeflenmektedir [32].

Tablo 3.6 İstanbul ulaşım altyapı ve emisyon göstergeleri

Gösterge	Değer (2025)	Açıklama
PM _{2.5} Yıllık Ortalama	26–35 µg/m ³	WHO sınırının 5–7 katı
NO ₂ Yıllık Ortalama	40–45 µg/m ³	AB sınır değerinin üzerine çıkıyor
Elektrikli Otobüs Sayısı	60+	Sürekli artırılıyor
Bisiklet Yolu Uzunluğu	160 km	Mikromobilite için önemli altyapı
Metro Uzunluğu	325 km	Raylı sistem ağı büyümekte

Tablo 3.6 İstanbul'a ait yeşil ulaşım ağlarının sayısal değerlerini ve emisyon ortalamalarını göstermektedir [31], [24], [32].

- **Ankara**

Kentsel Planlama, Toplu Taşıma Reformları: Ankara, Türkiye'nin ikinci en kalabalık şehri ve aynı zamanda başkenti olarak idari merkez olması, kış aylarında yoğun ısınma ihtiyacı ve kent çevresindeki sanayi alanlarıyla hava kirliliği açısından kritik illerden biridir. Özellikle kış aylarında PM₁₀ yoğunluğu, sınır değerlere yakın ya da üzerinde seyretmektedir. Ancak son yıllarda kentsel planlama vizyonu, temiz enerjiye geçiş ve ulaşım reformları, hava kalitesi açısından olumlu gelişmeler sağlamıştır [64]. Kentsel Yoğunluk ve Mekânsal Gelişim Dinamikleri; Ankara'da planlı konut alanları geniş oranda düşük yoğunluklu ve yaygın yerleşim formundadır; bu durum motorlu taşıta olan bağımlılığı artırmaktadır. Ancak son 5 yılda, çevre ilçelerde yoğunlaşan konut gelişimi, ısınma kaynaklı emisyonları artırmış; buna karşın doğalgaz altyapısı genişletilerek emisyon azaltımı sağlanmıştır. Yeşil koridor ve kent ormanı projeleri, mikrometeorolojik denge ve partikül tutulumu açısından önem kazanmıştır.

Toplu Taşıma Reformları ve Emisyon Azaltımı: CNG'li Otobüs Dönüşümü; Ankara Büyükşehir Belediyesi (ABB), son 10 yılda ulaşım filosunun dönüşümünü hızlandırmış, 2023 yılı itibarıyla EGO (Elektrik, Havagazı ve Otobüs İşletme Müessesesi) otobüslerinin %85'i CNG (Sıkıştırılmış Doğalgaz) ile çalışır hâle gelmiştir. CNG otobüsler, dizel sistemlere göre %90'a kadar daha az partikül ve %60 daha az NO_x emisyonu üretmektedir [65]. Raylı Sistem ve Hafif Metro Gelişimi; Mevcut Ankaray ve Metro hatları toplam 64 km uzunluğundadır. Etlik, Koru ve Kızılay bağlantı hatları ile birlikte bu kapasite artırılmaktadır. Raylı sistemler, özellikle sabah ve akşam pik saatlerde emisyon azaltımında büyük rol oynamaktadır. Yaya ve Bisiklet Ulaşımı; 2022'den bu yana Ankara'da kaldırım iyileştirme ve bisiklet yolu projeleri başlatılmıştır. "Kızılay-Dikmen bisiklet koridoru" pilot uygulama olarak devrededir. Ancak hâlen aktif bisiklet yolu uzunluğu İstanbul ve İzmir'in gerisindedir (yaklaşık 60 km) [65].

Isınma Kaynaklı Emisyonlar ve Planlı Dönüşüm; Ankara'nın özellikle Sincan, Etimesgut ve Mamak gibi ilçelerinde kömürle ısınma kaynaklı PM₁₀ artışı geçmişte ciddi sorun teşkil etmekteydi. 2019'dan itibaren yürürlüğe giren politika ile sosyal yardımlarda odun ve kömür desteği yerine doğalgaz yardımı verilmesi

benimsenmiştir. Ankara’da 2023 itibarıyla doğalgaz erişim oranı %99 seviyesine çıkarılmıştır. [65]-[66].

Tablo 3.7 Ankara hava kalitesi göstergeleri (2025)

Gösterge	Değer (2025)	WHO Sınırına Göre Durum
PM _{2.5} (ortalama)	20–27 µg/m ³	5 µg/m ³
PM ₁₀	35–55 µg/m ³	15 µg/m ³
NO ₂	28–40 µg/m ³	10 µg/m ³
CO	1.8–2.4 mg/m ³	4 mg/m ³

Ankara Büyükşehir yerleşimine ait T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın Ulusal Hava Kalitesi İzleme İstasyonlarından alınan verilerle 2025 yılına ait ortalama değerler Tablo 3.7’de verilmiştir [63].

Öne Çıkan Projeler ve Uygulamalar; Doğalgaz Dönüşüm Desteği: Sosyal belediyecilikle uyumlu hava kalitesi politikası. CNG Otobüs Modernizasyonu: Ankara Türkiye’de bu dönüşümü en erken tamamlayan büyükşehirdir. Atatürk Orman Çiftliği Eko-Rehabilitasyonu: Emisyon filtreleme açısından önemli yeşil alan düzenlemeleri. Kaldırım ve yaya öncelikli alan planlaması: Emisyon azaltımı ve erişilebilirlik hedefi.

- **İzmir**

Yeşil Ulaşım Politikaları ve Ağaçlandırma Çalışmaları: İzmir, Türkiye’nin en büyük üçüncü metropolü olarak, sanayi, liman faaliyetleri ve motorlu taşıt trafiği nedeniyle yoğun hava kirliliği baskısı altındadır. Ancak, kent yönetiminin 2019 sonrası başlattığı yeşil ulaşım politikaları, elektrikli araç teşvikleri, bisiklet altyapısının geliştirilmesi ve kent içi ağaçlandırma kampanyaları, İzmir’i sürdürülebilir şehircilik anlamında örnek bir kent hâline getirmiştir [67]-[68]. Ulaşım Kaynaklı Emisyonlara Karşı Politikalar: Elektrikli Ulaşım: ESHOT (İzmir Belediyesi Elektrik Su, Havagazı, Otobüs ve Trolleybüs Umum Müdürlüğü)’un Dönüşümü; İzmir’de ESHOT Genel Müdürlüğü, 2020 itibarıyla elektrikli otobüs filosu kurmuştur. 2023 sonu itibarıyla 100’e yakın elektrikli otobüs aktif olarak çalışmaktadır. ESHOT’un enerji ihtiyacı için karbondioksit salımı sıfır olan 1 MW kapasiteli güneş enerji santrali kurulmuştur. Bu sayede yılda yaklaşık 280 ton CO₂ emisyonu azaltımı sağlandığı rapor edilmiştir [68]-

[69]. İzmir Bisikletli Ulaşım Sistemi – BİSİM; 60’tan fazla istasyonda yaklaşık 1000 bisiklet ile İzmir’in kıyı ve merkez ulaşımı desteklenmektedir. 2023 itibarıyla İzmir genelinde bisiklet yolu uzunluğu 120 km’yi aşmıştır. “Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı (SKHP)” ile 2030 yılına kadar bu uzunluğun 200 km’ye çıkarılması hedeflenmektedir. Raylı Sistem ve Hafif Metro; İzmir’de mevcut metro ve tramvay hattı toplamı 57 km’dir [69]. Narlıdere-Fahrettin Altay hattı 2024’te devreye alınacaktır. Tramvay ulaşımı (Konak, Karşıyaka, Çiğli) hem karbon hem de partikül emisyonlarını azaltmaktadır [68]-[69].

Tablo 3.8 İzmir hava kalitesi göstergeleri (2025)

Kirletici	Değer (Ortalama, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	WHO Yıllık Sınır	Yorum
PM _{2.5}	22–28	5	Aşım
PM ₁₀	30–48	15	Aşım
NO ₂	24–35	10	Aşım
CO	1.5–2,1 mg/m ³	4 mg/m ³	Uygun

İzmir Büyükşehir yerleşimine ait 2025 yılı emisyon ölçüm ortalamaları Tablo 3.8’de verilmiş ve göstergelerden de analılacağı üzere bir değer dışında hepsi standart değerleri aşmıştır [62], [67].

Ağaçlandırma ve Yeşil Altyapı Stratejileri: İzmir Ağaçlandırma Eylem Planı; 2019–2023 arasında İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından yaklaşık 1,8 milyon ağaç dikilmiştir [68]. Yol kenarlarında partikül tutma kapasitesi yüksek türler tercih edilmektedir: İzmir Miras Yeşil Koridor Projesi; Tarihi akslar boyunca doğrusal yeşil koridor oluşturarak hem ekolojik bağlantılar sağlanmakta hem de mikroklima düzenlenmektedir. Bitkilendirme, yaya yoğunluğu yüksek arterlerde egzoz filtreleme amacıyla da tasarlanmaktadır. Kentsel Tarım ve Çatı Bahçeleri; 2021 yılında Karşıyaka’da başlatılan pilot “çatı tarımı ve yeşil çatı” uygulamaları hem karbon dengelemesi hem de sıcaklık düzenlemesi açısından yenilikçi adımlardır [68]-[69].

Tablo 3.9 İzmir öne çıkan projeler

Proje Adı	Etki Alanı	Emisyon Azaltımı / Hedef
Elektrikli Otobüs + GES Enerji Desteği	Karayolu toplu taşıma	Yıllık 280 ton CO ₂ azaltımı
BİSİM + Bisiklet Yolu Planlaması	Kıyı ve merkez ulaşımı	2030 hedefi: 200 km
İzmir Yeşil Koridor Projesi	Tarihi ve merkez akslar	Mikroklima ve PM _{2.5} tutumu
Ağaçlandırma (1.8 milyon ağaç)	Yol kenarları ve parklar	Biyofiltre kapasitesi artışı

İzmir'in yeşillendirme strateji kapsamında hayata geçen ve planlanan çalışmalar Tablo 3.9'da verilmiştir [68]-[69]. Bu çalışmalar İzmir genelinde temiz hava eylem planları için önem arz etmekte olup şehrin hava kalitesinin artırılmasında önemli bir yere sahiptir.

- **Bursa**

Organize Sanayi Bölgeleri ve Taşıma Kaynaklı Hava Kirliliği: Bursa, Türkiye'nin hem sanayi üretiminde hem de otomotiv sektörü açısından en önemli kentlerinden biridir. Bu özelliğiyle birlikte Bursa, hava kirliliği açısından da ülkenin en riskli büyükşehirlerinden biri hâline gelmiştir. Başta organize sanayi bölgeleri (OSB), yüksek motorlu araç trafiği, ısıtma kaynaklı emisyonlar ve sıkışık topoğrafya nedeniyle şehirde PM ve NO₂ düzeyleri, WHO ve AB sınırlarını düzenli olarak aşmaktadır [28], [63], [70].

Tablo 3.10 Bursa hava kalitesi göstergeleri (2025)

Kirletici	Değer (µg/m ³)	WHO Sınırı (Yıllık)	Durum
PM _{2.5}	28–38	5	Aşım
PM ₁₀	40–60	15	Aşım
NO ₂	30–40	10	Aşım
CO	1.9–2,4 mg/m ³	4 mg/m ³	Uygun

Tablo 3.10 Bursa Büyükşehir yerleşimine ait yıllık ortalama emisyon değerlerini ve bunların durumunu göstermektedir [70]-[72].

Organize Sanayi Bölgeleri ve Emisyon Baskısı; Sanayi Yoğunluğu: Bursa'da 18 adet OSB yer almakta olup, özellikle Nilüfer, Osmangazi ve Gürsu ilçeleri bu bölgelerin başlıca odak noktalarıdır. OSB'lerde otomotiv, tekstil, plastik ve metal sanayileri yoğun biçimde faaliyet göstermektedir. Sanayi kaynaklı PM_{2.5}, NO_x ve VOC emisyonları, Bursa'nın hava kalitesi göstergelerinde belirgin etkiler yaratmaktadır

[70]. Topoğrafik Sıkışma: Bursa ovası, çevresinin dağlık olması nedeniyle hava sirkülasyonunun zayıf olduğu bir havzadır. Bu durum, kirleticilerin şehir merkezinde birikmesine neden olmaktadır. Özellikle kış aylarında sıcaklık inversiyonu, PM₁₀ seviyelerinde ciddi artışlara yol açmaktadır. Taşımacılık Kaynaklı Kirlilik ve Önlemler; Ulaşım Emisyonları: Şehirde yaklaşık 900.000 kayıtlı motorlu araç bulunmaktadır [34]. Sanayi taşımacılığına bağlı olarak ağır vasıta trafiği şehir merkezinde ve çevre yollarda yoğunlaşmaktadır. Egzoz kaynaklı NO₂ ve PM_{2.5} emisyonları, özellikle OSB çevresindeki mahallelerde kritik düzeylere ulaşmaktadır.

Toplu Taşıma ve Elektrikli Araç Girişimleri: BURULAŞ (Bursa Ulaşım Toplu Taşıma İşletmeciliği Turizm Sanayi ve Ticaret A.Ş.) bünyesinde elektrikli raylı sistemler (Bursaray) şehir içi ulaşımın %17'sini karşılamaktadır. Ancak, elektrikli otobüs yatırımları sınırlıdır; filonun büyük kısmı hâlen dizel motorludur. 2022'de başlatılan “Yeşil Ulaşım Planı” kapsamında, 2026'ya kadar 50 elektrikli otobüs hedeflenmiştir [71]. Temiz Hava Eylemleri ve Ağaçlandırma Stratejileri; Bursa Temiz Hava Eylem Planı [70]. OSB'lere filtreleme ve baca emisyon denetimi zorunluluğu. Doğalgaz altyapısının yaygınlaştırılması. Toplu taşıma teşviki ve mikromobilité sistemlerinin kurulması. Yeşil Kuşak ve Ağaçlandırma Politikaları: 2020–2023 arasında 750.000 yeni fidan dikilmiştir. Yol kenarı, sanayi çevresi ve okul alanlarına *Tilia tomentosa*, *Cedrus libani*, *Cupressus sempervirens* gibi hava filtreleyici türler uygulanmaktadır [70]-[71].

Tablo 3.11 Bursa BB temiz hava raporu

Proje / Politika	Etki Alanı	Amaç / Sonuç
Bursa Temiz Hava Eylem Planı (2019)	Sanayi, konut, ulaşım	Emisyon azaltımı, doğalgaza geçiş
Bursaray Raylı Sistem	Şehir içi ulaşım	Ulaşım kaynaklı NO ₂ ve PM azaltımı
Ağaçlandırma Seferberliği	OSB çevresi ve yollar	Partikül tutma, yeşil tampon kuşağı
2026 Elektrikli Otobüs Hedefi	BURULAŞ otobüs filosu	50 yeni elektrikli araç planlanmaktadır

Bursa Büyükşehir Belediyesi'nin 2019 ve sonraki yıllarda yayımladığı “Temiz Hava Raporları” Bursa'nın hava kalitesini düzeltmeyi amaçlamaktadır ve bu amaç için yapılacak uygulamalar Tablo 3.11'de verilmiştir [70]-[71]-[72].

4. HAVA TEMİZLEMEDE KULLANILAN BİTKİLER VE ÖZELLİKLERİ

Kent içi hava kirliliği, özellikle ulaşım kaynaklı emisyonların yoğun olduğu yol koridorlarında ciddi çevresel ve sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Doğa tabanlı çözümler (Nature-Based Solutions) NBS kapsamında yol kenarı bitkilendirme uygulamaları, kirleticilerin yayılımını azaltmada etkili araçlar olarak değerlendirilmektedir [23]. Bitkiler, hava temizleyici işlevlerini gaz emme, partikül madde tutma, gölgeleme ve nem düzenleme gibi biyofiziksel mekanizmalarla gerçekleştirir.

4.1. Bitkilerin Hava Kirleticilere Etkisi

Kent içi ulaşım sistemleri başta olmak üzere fosil yakıt temelli insan faaliyetleri, atmosferdeki kirletici konsantrasyonlarının artmasına neden olarak halk sağlığı, çevre kalitesi ve kent yaşanabilirliği üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır. Bu kapsamda, doğa tabanlı çözümler arasında yer alan bitkisel düzenlemeler, hava kirleticilerin yayılımının kontrolünde hem aktif hem de pasif filtreleme işlevi üstlenmektedir [11], [23].

4.1.1. Gaz Halindeki Kirleticiler Üzerindeki Etki

Bitkiler, başta karbon dioksit (CO_2) olmak üzere azot oksitler (NO_x), ozon (O_3) ve sülfür dioksit (SO_2) gibi gaz halindeki kirleticileri stomaları (gözenekleri) yoluyla atmosferden absorbe ederek hücre içi metabolik süreçlerde kullanabilir. Bu süreç özellikle fotosentez yoluyla CO_2 'nin sabitlemesini içerir ve atmosferik karbonun azaltılmasına doğrudan katkı sağlar [6]. Özellikle geniş yapraklı, stomal yoğunluğu yüksek ve yıl boyu aktif olan türler (*Platanus spp.*, *Quercus spp.*, *Cedrus spp.*) bu açıdan oldukça etkilidir. *Platanus acerifolia* (Londra çınarı) gibi geniş yapraklı türlerin hektar başına yıllık CO_2 sabitleme kapasitesi 2–4 ton arasında değişebilir [44]. Yaprak yüzey sıcaklığını düşürerek troposferik ozon oluşumunu da baskılayabilirler [17].

4.1.2. Partikül Madde (PM_{10} ve $\text{PM}_{2.5}$) Tutma Etkisi

Bitkiler, yaprak yüzeylerine tutunan katı parçacıklar (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$) aracılığıyla özellikle trafiğin yoğun olduğu bölgelerde hava kalitesini iyileştirir. Bu etki, aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- **Yaprak morfolojisi:** Özellikle yüzey pürüzlülüğü ve tüy yoğunluğu, partikül madde tutma kapasitesini önemli ölçüde etkilemektedir [45].
- **Bitki yüksekliği ve konumlandırması:** Kirleticilerin dikey dağılımına müdahale etmek amacıyla katmanlı bitkilendirme esastır. Egzoz çıkış seviyesindeki (0-1,5 m) kirlilik yükü çalı ve yer örtücülerle karşılanırken; üst katmanlara taşınan partiküller ağaç kanopileri tarafından tutulmaktadır.
- **Yaprak yoğunluğu:** Dallanma sıklığı ve yaprak dizilişindeki yoğunluk, toplam adsorpsiyon yüzeyini artırarak daha fazla kirletici yükünün tutulmasına olanak tanır [25].

Park, Kim, Lee ve Ryu (2022) de kentsel alanlarda yaygın kullanılan bitki türlerini inceleyerek, geniş yüzey alanı ve pürüzlü yaprak morfolojisine sahip türlerin PM azaltımında daha etkin olduğunu göstermiştir [45]. Popek ve arkadaşlarının (2013) çalışmasına göre iğne yapraklı türler, yüzeyin pürüzlülüğü nedeniyle PM_{2.5} partiküllerinde daha yüksek tutulum oranlarına sahiptir. Özellikle *Cedrus libani* (Lübnan Sediri) ve *Pinus nigra* (Kara Çam), yıl boyu yaprak dökmemesi sayesinde sürekli filtre görevi görür [11].

4.1.3. Kirliliğin Maruziyet Seviyesini Azaltma

Yapısal olarak düzenlenmiş yeşil bariyerler hem fiziksel engel oluşturur hem de kirleticilerin yatay ve dikey yayılım yönünü değiştirerek çevreye ulaşmadan önce çözümlerini sağlar. Özellikle çok katmanlı bitkilendirme tasarımları (ağaç + çalı + yer örtücü) bu etkiyi artırır [25]. Bu yöntem;

- Yaya seviyesindeki maruziyeti azaltır,
- Mikroklimayı düzenler,
- Kirleticilerin sokak kanyonu içinde hapsolmasını önler [23].

4.1.4. Tür Bazlı Performans Değerlendirmesi

Farklı türlerin hava temizleme kapasiteleri literatürde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bitki seçimi yalnızca tekil tür performansına değil, birlikte yaratılacak ekolojik sinerjiye göre yapılmalıdır [46]. Chen ve arkadaşları (2023) subtropikal bir kentte yürüttükleri çalışmada farklı şehir içi bitki türlerinin yaprak yüzeylerinde PM_{2.5} ve toksik iz element birikim kapasitesini karşılaştırmalı olarak incelemiş ve türler arasında belirgin farklılıklar bulunduğunu ortaya koymuştur [46]. Yapılan ölçümler,

bazı yaprak tiplerinin (örneğin geniş yapraklı türlerin) partikül tutma kapasitesinin iğne yapraklı türlere göre daha yüksek olabileceğini göstermektedir.

Tablo 4.1 Farklı türlerde bazı bitkilerin hava temizleme kapasiteleri

Tür Adı	Kirletici Türü	Etki Mekanizması	Etki Düzeyi
Cedrus libani	PM _{2.5} , CO ₂	Fiziksel tutulum, absorpsiyon	Yüksek
Quercus ilex	NO ₂ , CO ₂	Stomal emme	Yüksek
Hedera helix	PM ₁₀	Yaprak yüzeyi birikimi	Orta/Yüksek
Lavandula spp.	PM _{2.5}	Balmumu kaplı yapraklar	Orta

Bitkilerin kendi içinde; ağaç, çalı, yer örtücü, sarılıcı gibi kategorilere ayrılması ve yaprak döken, herdem yeşil olmak üzere özelliklerine göre emisyon tutma kapasiteleri değişiklik göstermekte olup Tablo 4.1’de bazı türlere ait örnek emisyon tutma kapasiteleri göreceli olarak gösterilmiştir.

4.2. Gaz ve Partikül Madde Emme Mekanizmaları

Kent içi ulaşım kaynaklı hava kirleticilerinin azaltımında bitkilerin rolü, temel olarak gazların emilimi (absorpsiyon) ve katı partikül maddelerin fiziksel tutulumu (adsorpsiyon) olmak üzere iki ana mekanizmaya dayanır. Bu süreçler, bitkilerin anatomik ve morfolojik yapısı, çevresel koşullar ve tür özellikleriyle birlikte etki düzeyini belirler [11]. Bui ve arkadaşları (2022), özellikle geniş yüzey alanına ve yüksek stomatal yoğunluğa sahip yaprakların PM tutma kapasitesinin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur [47].

-Gaz Emme (Absorpsiyon) Süreci: Gaz halindeki kirleticiler; karbon dioksit (CO₂), azot dioksit (NO₂) ve sülfür dioksit (SO₂) olmak üzere bitki yapraklarındaki stomalar (gözenekler) yoluyla absorbe edilir. Bu gazlar, bitkinin iç dokularına geçerek:

- Fotosentez sürecine dahil edilir (CO₂),
- Kimyasal yıkıma uğrar (NO₂ → NO₃⁻ gibi),
- Hücre düzeyinde nötralize edilir (SO₂ → sülfat birikimi) [6].

Bu süreç özellikle geniş yüzeyli, yüksek stomal yoğunluğa sahip ve metabolik aktivitesi yüksek türlerde daha verimlidir. *Platanus acerifolia* gibi türlerde CO₂ sabitleme kapasitesinin yılda 20–30 kg’a kadar ulaşabildiği rapor edilmiştir [44].

Bitki türüne, yaprak yaşına, stomaların açıklık durumuna (gündüz/gece, nem, sıcaklık gibi etkenlerle değişir) ve çevresel koşullara bağlı olarak gaz absorpsiyon etkinliği önemli ölçüde değişkenlik gösterir [46].

-Partikül Madde Tutulumu (Adsorpsiyon): Bitkiler, hava kaynaklı katı partikülleri (özellikle PM₁₀ ve PM_{2.5}) yaprak yüzeylerine tutarak atmosferden uzaklaştırırlar. Bu süreç, temel olarak partiküllerin yaprak yüzeyinde fiziksel olarak tutulması (adsorpsiyon/kuru depozisyon) prensibine dayanır ve bitki morfolojisi ile çevresel değişkenlerin etkileşimi sonucunda şekillenir:

1. Yaprak Mikromorfolojisi: Partikül bağlama kapasitesi, yaprak yüzey karakteristiği ile doğrudan ilişkilidir.

-Pubesans (Tüylülük): Yaprak yüzeyindeki trikom (tüy) yoğunluğu, partiküllerin tutunabileceği yüzey alanını artırarak mekanik tutulumu güçlendirir.

-Yüzey Topografisi: Girintili-çukurlu (rugose) yüzey dokusu, pürüzsüz yüzeylere kıyasla partikül yakalama verimliliğini maksimize eder.

-Epikutiküler Mum Tabakası: Yaprak üzerindeki mumsu (waxy) katman, hidrofobik karakter kazandırmanın yanı sıra, partiküllerin yüzeye yapışmasında (adhezyon) katalizör etkisi görerek tutulumu artırmaktadır [23].

2. Yapısal Yoğunluk ve Konumlandırma: Kanopi yoğunluğu ve katmanlı bitkilendirme (stratifikasyon), partikül dispersiyonunu fiziksel bariyer etkisiyle sınırlar. Özellikle egzoz emisyon kotunda konumlandırılan çalı ve yer örtücüler, yaya seviyesindeki (breathing zone) partikül maruziyetini minimize etmede stratejik öneme sahiptir.

3. Meteorolojik Etkileşim ve Yıkanma (Wash-off): Bitki yüzeyinde biriken partiküllerin akıbeti, iklimsel dinamiklere bağlıdır. Partiküller, yağış etkisiyle yıkanarak toprağa transfer olabileceği gibi (wash-off), rüzgâr etkisiyle yeniden atmosfere karışabilir (resüspansiyon). Bu bağlamda Chen ve ark. (2023), nemli iklimlerde yağışa bağlı yıkanma etkisiyle yaprak üzerindeki partikül tutum verimliliğinin %30 oranında azaldığını; buna karşın kurak bölgelerde depozisyon süresinin uzadığını rapor etmiştir [46].

Tablo 4.2 Bazı kent ağaç ve çalı türlerinin PM tutma performansları

Tür	Yaprak Tipi	PM _{2.5} Tutum Verimi (µg/cm ²)
Cedrus deodara	İğne	12,5
Buxus sempervirens	Geniş	10,2
Quercus ilex	Geniş	9,8
Lavandula angustifolia	Geniş	6,4

Tablo 4.2’de bazı bitki türlerine ait İ-Tree Eco üzerinden alınmış sayısal değerler gösterilmiş ve farklı tür ve özelliklere ait bitkilerin PM_{2.5} tutma kapasiteleri gösterilmiştir [11], [46]- [47]. Elde edilen bulgular, otoyol kenarlarında bitkilendirme stratejisi oluşturulurken tür seçiminin yalnızca estetik değil, aynı zamanda fonksiyonel hava kalitesi yönetimi açısından da bilimsel temele dayanması gerektiğini göstermektedir.

4.3. Ağaç ve Çalı Türlerinin Hava Temizleme Kapasitesi

Kent içi ulaşım kaynaklı hava kirliliğini azaltmak amacıyla kullanılan bitkilerin etkinliği yalnızca tür bazında değil, aynı zamanda bitki formu, yaprak morfolojisi, dallanma yoğunluğu ve yüzey yapısı gibi morfolojik özelliklerine göre de değerlendirilmelidir. Bitkinin genel formu, rüzgârla taşınan kirleticilerin yönünü değiştirme, süspanse parçacıkları tutma ve atmosferik gazları absorbe etme kapasitesini doğrudan etkiler [23].

-Bitki Formları ve Fonksiyonları: Bitkiler morfolojik yapılarına göre genellikle ağaç, çalı, sarılıcı ve yer örtücü olarak sınıflandırılır. Her bir formun hava kalitesi üzerindeki etkisi farklı düzeylerde gerçekleşir:

- Ağaçlar: En büyük biyokütleyle sahip oldukları için özellikle CO₂ absorpsiyonu açısından en etkili bitki formudur. Geniş taç yapısı ve yüksek gövde sayesinde hem yayılımı engeller hem de rüzgârla taşınan kirleticilerin yönünü değiştirir. *Platanus acerifolia* gibi türlerin tekil olarak 20 m çapında etki alanı oluşturabildiği gözlenmiştir [44].
- Çalılar: Egzoz seviyesiyle eş yükseklikte bulunmaları nedeniyle PM₁₀ ve PM_{2.5} tutumunda kritik rol oynarlar. Ayrıca yaya maruziyetini azaltmada tampon bariyer görevi görürler [46].
- Yer Örtücüler: Düşük büyüme formuna sahip bu bitkiler, özellikle yol kenarlarında yüzeye yakın partikül dağılımını tutmada etkilidir. Ayrıca yağmur

suyuyla birlikte yüzeye taşınan kirleticilerin biyofiltrasyonuna katkı sağlarlar [47].

-Sarılcılar ve Tırmanıcılar: Dikey yüzeylerde yayılım gösterdiklerinden, yüzey alanı artırıcı etki sağlarlar. Duvar kaplamalarında hem ısı regülasyonu hem de PM birikim yüzeyi olarak işlev görürler [11].

-Yaprak Yapısı ve Yüzey Özellikleri: Bitkilerin yaprak yüzeyi özellikleri, özellikle partikül tutma kapasitesi açısından belirleyicidir. Yaprak morfolojisi aşağıdaki faktörlere göre değerlendirilir:

-Yaprak Tipi: Geniş yapraklı türler (*Quercus ilex*, *Platanus spp.*): Daha fazla gaz alışverişi ve partikül tutumu sağlar. İğne yapraklı türler (*Cedrus libani*, *Pinus nigra*): Dört mevsim yapraklı oldukları için sürekli PM tutma avantajına sahiptir.

-Yüzey Özelliği: Tüylü yapraklar kirleticilerin mekanik olarak tutulmasında etkilidir. Balmumu kaplı yapraklar partiküllerin yaprağa yapışmasını kolaylaştırır ve yıkama sonrası kalıntıyı azaltır. Girintili-çukurlu yaprak kenarları hava akımını yavaşlatarak PM'nin yaprak üzerine düşme süresini artırır.

-Dallanma ve Taç Yoğunluğu: Bitkinin dal yoğunluğu ve taç hacmi, atmosferde süspanse halde bulunan kirleticilerin hareketini yavaşlatır ve tutulum olasılığını artırır. Özellikle çok katmanlı dallanma sistemine sahip çalılar ve ağaçlar, dikey hava akışını engelleyerek kirleticilerin yükselmeden yaprak yüzeyine çarpmasını sağlar [6]. Taç yoğunluğu yüksek olan türler, hem gölgeleme etkisiyle troposferik ozon oluşumunu baskılar hem de yüzey sıcaklığını düşürerek kirleticilerin atmosferik reaksiyonlarını yavaşlatır [17].

4.4. Yaprak Yapısı, Genişliği ve Yüzey Özellikleri

Kent içi hava kalitesi parametreleri üzerinde etkili olan bitkisel morfolojik unsurların başında yaprak özellikleri gelmektedir. Yaprak yapısı, genişliği ve yüzey pürüzlülüğü gibi mikro-morfolojik değişkenler; PM, NO_x, SO₂ ve O₃ kirleticilerinin bitki bünyesindeki birikim ve emilim dinamiklerini doğrudan şekillendirmektedir. Geniş yaprak yüzeyine sahip türler, artan yüzey alanlarına bağlı olarak kirletici partiküller için daha fazla tutunma yüzeyi sağlamakta ve böylece yüksek bir retansiyon kapasitesi sergilemektedir. Yapılan çalışmalarda, *Platanus orientalis* (Doğu çınarı), *Tilia tomentosa* (Ihlamur), *Quercus robur* (Meşe) gibi geniş yapraklı türler, özellikle

PM₁₀ ve PM_{2.5} tutumunda etkin bulunmuştur [48]-[49]. Bu türlerdeki geniş yaprak alanı, hem partikül filtrasyonunu fiziksel olarak artırmakta hem de stomal gaz değişim kapasitesini yükselterek kirletici eliminasyonunu kolaylaştırmaktadır.

Yüzey Dokusu ve Tüyenme (Trikomlar); yaprak yüzeyindeki mum tabakası (kutikula), tüyenme (trikom yoğunluğu), girinti-çıkıntılar ve gözenekli yapılar, partikül tutulumunu artıran mikro-morfolojik faktörlerdir. Özellikle tüyenmiş veya pürüzlü yapraklara sahip türler *Robinia pseudoacacia* (Yalancı Akasya), çevresel PM konsantrasyonunu azaltmada daha etkilidir [50]. Ayrıca trikomlar, yaprak yüzeyinde partiküllerin mekanik olarak tutulmasına yardımcı olmakla kalmaz; aynı zamanda bu yüzeylerde yoğunlaşan ağır metallerin de bitki dokularına geçmeden sabitlenmesini sağlar.

Yaprak Tipi; bitkisel materyalin hava kalitesi üzerindeki etkisi, yaprak morfolojisine bağlı olarak iğne ve geniş yapraklı türler ekseninde farklılık göstermektedir. *Cupressus sempervirens* (Kara Selvi) ve *Pinus nigra* gibi iğne yapraklı türler, her dem yeşil (evergreen) karakterleri sayesinde yıl boyunca yaprak varlıklarını korumakta; böylelikle kış aylarında da yeşil doku sürekliliği sağlayarak partikül madde (PM) tutulumuna devam etmektedir. Buna karşın geniş yapraklı türler, vejetasyon dönemini kapsayan ilkbahar ve yaz aylarında yüksek fotosentetik aktivite ve evapotranspirasyon kapasiteleri ile partikül madde gideriminde daha etkin rol oynamaktadır. Mevcut literatür ve araştırmalar, iğne ve geniş yapraklı türlerin birlikte kullanıldığı karma dikim kombinasyonlarının, mevsimsel avantajları birleştirerek hava kalitesi yönetiminde monokültürlere kıyasla daha verimli sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir [23].

Yaprak yaşı ve kirlilik toleransı; yaşlı yapraklar genellikle daha fazla PM biriktirmiş olsa da genç yapraklar üzerinde kirlilik kaynaklı hasarlar daha belirgindir. Bu durum, bitki türlerinin biyotik dayanıklılık kapasitesini de önemli bir kriter olarak gündeme getirir. *Nerium oleander* (Zakkum) ve *Ligustrum japonicum* (Kurtbağrı), yaprak yüzeyi kirlilikle kaplansa dahi yapısal fonksiyonlarını koruyabilmektedir.

4.5. Kentsel Yeşil Alan Planlamasında Bitki Seçimi

Bitki seçimi yapılırken yalnızca türün biyolojik performansı değil, aynı zamanda kentsel iklim, toprak koşulları, bakım gereksinimi ve türün yerel

iklime adaptasyonu da dikkate alınmalıdır. Ayrıca, kent içi alanlarda yer örtücüler, sarılıcılar, çalılar ve ağaçlar bir arada kullanılarak çok katmanlı yeşil koridorlar oluşturulmalıdır [51]. Kentsel alanlarda hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik yeşil altyapı uygulamaları, yalnızca biyolojik çeşitlilik sağlamakla kalmaz, aynı zamanda hava kirleticilerin tutulması, gölgeleme, ısı adası etkisinin azaltılması ve mikroklima düzenlemesi gibi çok yönlü çevresel faydalar üretir [23]. Bu faydaların sürdürülebilir biçimde elde edilebilmesi, doğru bitki türlerinin, doğru yerde ve uygun tekniklerle seçilmesine bağlıdır.

-i-Tree Modeli: i-Tree, Amerika Birleşik Devletleri Orman Servisi (US Forest Service) tarafından geliştirilmiş bir yazılım/dizi araçlardan oluşan bir sistemdir. Amaçları arasında: Şehir ve banliyö ormanlarının bugünkü durumunun ölçülmesi (ağaç sayısı, tür dağılımı, yapısal özellikler vb.). Bu yeşil altyapının sunduğu ekosistem hizmetlerinin nicel ve monetarize edilmesi (karbon tutulumu, hava temizleme, gölgelendirme, yağmur suyu tutma vb.). Planlama ve yönetim kararları için bilimsel veri sağlanması vardır ve i-Tree uygulamaları arasında Eco, Canopy, Hydro, Design, Landscape, Imagine, Cool Climate vb. modüller yer alır [52].

Tablo 4.3 i-Tree Eco girdiler ve çıktılar

Kategori	İçerik
Girdiler (Inputlar)	Ağaç envanteri: tür, gövde çapı (DBH: Diameter at Breast Height), tepe/taç genişliği, yükseklik, sağlığı (crown dieback, missing crown), tepe örtüsü vb. Rasgele örnek parseller (fixed-area plots) veya tam envanter (comprehensive inventory) seçenekleri Yerel meteorolojik veriler: sıcaklık, yağış, hava kirliliği konsantrasyonları saatte bir veya saatlik ölçümler (özellikle ozon, NO₂, SO₂, CO, PM) Arazi kaplaması (land use / cover), toprak tipi gibi çevresel değişkenler; bitki örtüsü örtüsü oranları, yaprak alan indeksi (Leaf Area Index, LAI) Yerel birim giderleri veya yapı-enerji kullanımı verileri (özellikle binaların gölgelendirme veya rüzgâr bariyeri etkileri için)
Çıktılar (Outputlar / Hizmetler)	Karbon depolama (carbon storage): mevcut ağaç dokusu içerisinde tutulmuş karbon miktarı Yıllık karbon tutumu (carbon sequestration): ağacın büyümesiyle veya yeni dikilenler ile atmosfere daha az CO₂ salımı sağlanmış olur Hava kirliliği giderimi (pollution removal): O₃, NO₂, SO₂, CO, PM_{2.5} gibi kirleticilerin ağaçlar tarafından absorbe ya da filtre edilmesi Enerjiye yönelik etkiler: binalarda gölgelendirme, rüzgâr bariyeri gibi etkilerle enerji tasarrufu ve dolayısıyla fosil yakıt kullanımının azalması → dolaylı CO₂ azaltımı Yapısal / varlık değeri (structural value): ağaçların estetik, gölge, peyzaj değeri; ekonomik değer biçme için kullanılır Su Yönetimi Hizmetleri: yağmur suyunun tutulması (rainfall interception), yüzey akışı kontrolü gibi ekosistem servisleri

Tablo 4.3'te i-Tree programının kullanım esaslarına ilişkin girdiler ve çıktıları gösteren detaylı açıklamalar yer almaktadır ve modelin İşleyişi, metodolojik özellikleri, modelin işleyiş ve metodolojisi bölümler halinde verilmiştir [52].

-Örnekleme Tipi: i-Tree Eco'da genellikle iki yol vardır: random sample sabit alan parselleri (fixed-area plots) ya da tamamlayıcı envanter (comprehensive inventory).

-Tepedeki Gövde ve Yaprak Ölçümleri: DBH, taç genişliği, tepe eksikliği, yaprak örtüsü gibi ölçümler alınır; yaprak alan indeksi (LAI) bazı çalışmalarda uydudan veya yerel hesaplardan kullanılır.

-Kirlетici Giderim Hesapları: Kirlетici akışları (pollutant flux) ve depozisyon modelleri kullanılır. Örneğin hava kirlетicilerinin ağaç yaprakları veya diğer yüzeyler üzerinden tutulma hızı (deposition velocity) gibi parametreler modelin içinde yer alır.

Tablo 4.4 Çalışma alanında kullanılması hedeflenen bitki türlerinin emisyon azaltım değerlerinin i-tree modeli ile hesaplanması

Bitkiler	Emisyonlar		
	NO ₂ (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	Co (kg/s)
<i>Abies concolor</i> /Gökmar	2,61	0,088	0,0013
<i>Acer campestre</i> /Ova Akçaağacı	1,77	0,72	0,011
<i>Callistemon laevis bush</i> /Fırça Çalısı	0,47	0,15	0,0014
<i>Catalpa bignonioides</i> /Katalpa	1,61	0,6	0,011
<i>Cedrus atlantica</i> /Atlas Sediri	1,45	0,6	0,0015
<i>Cedrus libani</i> /Lübnan Sediri	1,45	0,6	0,011
<i>Cotoneaster dammeri</i> /Dağ Muşmulası	0,28	0,06	0,0017
<i>Cupressus sempervirens</i> /Kara Selvi	1,45	0,53	0,011
<i>Juniperus chinensis</i> /Ardıç	0,63	0,28	0,0018
<i>Ilex aquifolium</i> /Çoban Püskülü	0,69	0,22	0,011
<i>Nerium oleander</i> /Zakkum	0,53	0,01	0,0019
<i>Picea abies</i> /Batı Ladini	2,31	0,15	0,011
<i>Pinus mugo</i> /Dağ Çamı	0,5	0,15	0,002
<i>Quercus robur</i> /Meşe	1,39	0,32	0,011
<i>Robinia pseudoacacia</i> /Yalancı Akasya	1,55	0,53	0,0021
<i>Taxus baccata</i> /Porsuk ağacı	2,25	0,95	0,011
<i>Viburnum opulus</i> /Kartopu	0,22	0,06	0,0022

Çalışma kapsamında; iklim, adaptasyon, tür özellikleri ve birçok etmenin göz önüne alınarak belirlenen bitki türlerine ait emisyon tutma kapasitelerini Tablo 4.4’de i-Tree programı yardımıyla belirlenmiştir.

-Projeksiyon / Senaryo Seçenekleri: Yeni dikilecek ağaç sayısı, bakım durumu, ölüm oranları, iklim değişikliği senaryoları, böcek hastalıkları etkisi gibi senaryo parametreleri kullanıcı tarafından belirlenebilir.

-i-Tree Eco’nun Avantajları ve Sınırlılıkları: i-Tree Eco modeli, kentsel ağaçlandırma uygulamalarının hava kalitesi, karbon sekestrasyonu ve ekosistem hizmetleri üzerindeki etkilerini nicel olarak değerlendiren en kapsamlı uluslararası araçlardan biridir. Modelin başlıca avantajı, ekosistem hizmetlerini yalnızca biyofiziksel göstergelerle değil, aynı zamanda parasal değerlerle sunabilmesi sayesinde karar vericilere somut, karşılaştırılabilir ve politika geliştirmeye uygun çıktılar sağlamasıdır [4], [40]. Tür, gövde çapı, yaprak alanı, taç örtüsü gibi yapısal özelliklere ilişkin ayrıntılı veri kullanımı, kentsel yeşil altyapının fiziksel durumunun ölçülebilir bir çerçeveye oturmasına olanak tanımaktadır [40]. Ayrıca model, enerji tasarrufu, yağmur suyu yönetimi, karbon depolama, hava kirletici tutumu gibi doğrudan ve dolaylı ekosistem hizmetlerini bütüncül olarak değerlendirebilmekte; bu yönüyle klasik tek değişkenli değerlendirme modellerine kıyasla daha kapsamlı bir çevresel analiz sunmaktadır [4], [40]. Farklı mekânsal ölçeklerde (parsel, mahalle, şehir) uygulanabilir olması hem mikro düzeyde hem de bütün kent ölçeğinde stratejik planlama yapılmasını mümkün kılmaktadır. Ücretsiz ya da düşük maliyetle erişilebilir olması da modelin özellikle belediyeler, kamu kurumları ve akademik araştırmacılar tarafından yaygın biçimde kullanılmasını kolaylaştırmaktadır [40]. Bununla birlikte i-Tree Eco, bazı sınırlılıkları nedeniyle dikkatli kullanılmayı gerektirmektedir. Modelin farklı iklim kuşaklarında ve ekolojik bölgelerde uygulanabilmesi için yerel adaptasyon yapılması gerekmekte; özellikle yerel kirletici konsantrasyonları, bitki türlerinin ekolojik özellikleri ve meteorolojik verilerin güncel ve doğru biçimde tanımlanması önem arz etmektedir [4], [40]. Veri toplama süreci, özellikle ağaç sağlığı, yaprak alan indeksi (LAI), taç genişliği ve örnek parsel ölçümleri gibi saha temelli çalışmalar gerektirdiğinden yüksek iş gücü ve zaman maliyeti oluşturmaktadır [40]. Ekosistem hizmetlerinin parasal değerlemeye dayalı çıktılarında, işçilik ücretleri, enerji fiyatları ve bakım maliyetleri gibi yerel ekonomik parametrelerin doğru

belirlenmemesi, sonuçlarda belirsizlik yaratabilecek önemli bir kısıttır. Ayrıca modelin hava kirliliği giderimi ve karbon sekestrasyonuna ilişkin varsayımları düzenli bakım, sulama, budama veya çevresel stres faktörlerinin yokluğu gibi ideal koşullara dayanmakta; bu durum gerçek saha koşullarındaki değişkenlikle zaman zaman uyumsuz sonuçlar üretebilmektedir [4]. Dolayısıyla i-Tree Eco güçlü bir karar destek aracı olmakla birlikte, saha verisi, iklim özellikleri ve yerel koşullar temelinde uyarlama ve dikkat gerektiren bir modeldir [4], [40].

Tablo 4.5 i – Tree modelinin uluslararası çalışma örnekleri

Çalışma / Bölge	Kullanım Alanı / Konusu	Öne çıkan Bulgular
Szeged, Macaristan (i-Tree Eco)	Kentsel ormanların karbon sekestrasyonu ve hava kirliliği giderimi analizleri	Park ve sokak ağaçlarının hava kalitesine katkısı, karbon tutulumu değerleri sunulmuş; yönetim için somut plan seçenekleri önerilmiş.
Great Britain	Şehir orman yönetimi için i-Tree Eco'nun uygulanabilirliği üzerine değerlendirme (politik, operasyonel)	Belediye karar alıcıları için somut verilerle strateji oluşturulabilmesini sağlayan çıktılar; hizmet, maliyet ve bakım faktörleri üzerine vurgular.
Nordic Şehirler	13 şehirde i-Tree Eco kullanılarak biyofiziksel yapı ve ekosistem hizmetlerinin tahmini; şehirlerin ve sorumluların modelden beklentileri araştırılmıştır	Beklentiler arasında yönetsel karar destek, kamu farkındalığı, politika entegrasyonu öne çıkmış; veri toplama ve yerel adaptasyonla ilgili zorluklar vurgulanmış.
Ann Arbor, Michigan, ABD	Sokak ve park ağaçlarının hava kirlleticilerinin giderimi ve karbon sekestrasyonu	Ağaçların yıllık olarak önemli miktarda PM, NO ₂ vs. temizleme sağladığı, karbon depolama değerlerinin yıllık artış gösterdiği bulunmuş.

i-Tree modeli ile ulusal ve uluslararası yapılan çalışmalar ve bu çalışmalara ait kısa bilgiler Tablo 4.5’de verilmiş olup hava kalitesi etkileri gösterilmiştir [52]-[53]-[54]-[55]-[56].

-Tür Seçiminde Dikkate Alınması Gereken Kriterler

Bitki seçimi yapılırken aşağıdaki kriterler bir bütün olarak değerlendirilmelidir [25], [44].

- Hedeflenen kirleticisi türü (CO₂, NO₂, PM_{2.5} vb.),
- Bölgenin ekolojik ve iklimsel koşulları,
- Toprak tipi ve bakım gereksinimi,
- Bitkinin morfolojik yapısı ve büyüme formu,

- Arazi kullanımı (yaya yolu, refüj, kavşak, otoyol kenarı vb.),
- Görsel ve peyzaj estetiği katkısı,
- Alerjen ve toksik özellikler (insan sağlığına etkisi).

Tablo 4.6 Bitki türlerinin basit sınıflandırması

Kategorilere Göre	Tohum Yapısına Göre	Yaprak Yapısına Göre
Ağaçlar	Açık Tohumlular	Geniş Yapraklı
Çalılar	Kapalı Tohumlular	İğne Yapraklı
Sarılcılar		
Yer Örtücüler		

Tablo 4.6’da bitkilerin basit şekilde sınıflandırılmasına ait kategoriler gösterilmekte ve yaprak yapılarına göre ayrılmaktadır [57].

-Örnek Bitki Seçimleri ve Uygulama Alanlarına Göre Dağılım

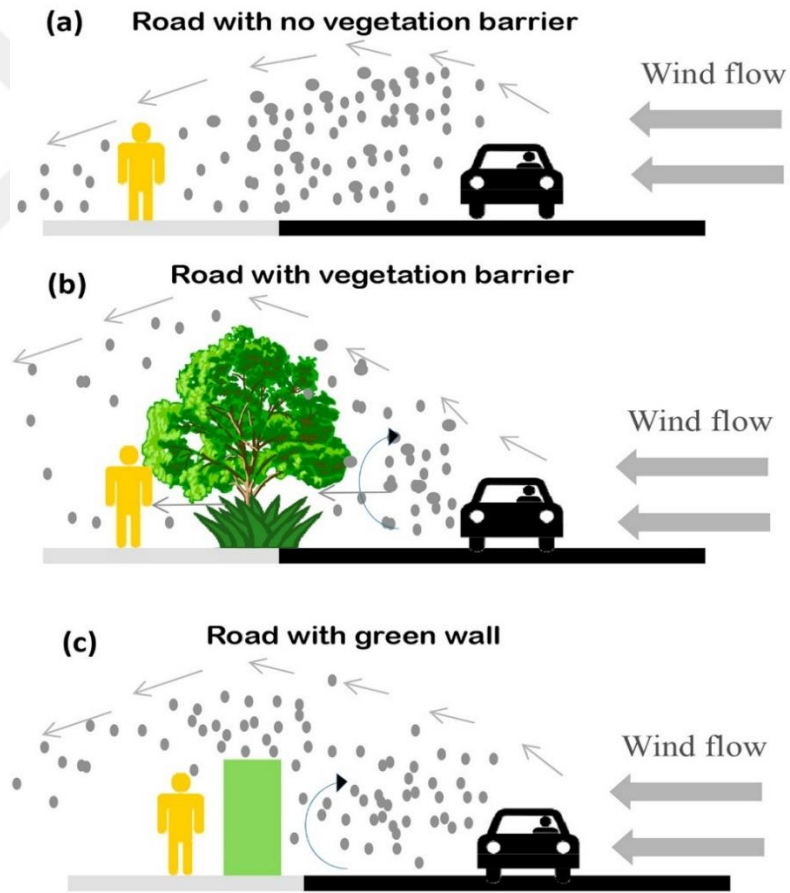
Otoyol kenarları, rüzgâr ve partikül bariyeri için; *Elaeagnus angustifolia* (İğde), düşük su ihtiyacı, rüzgâr ve egzoz gazlarına dayanıklılık, *Pinus brutia* (Kızılçam) yüksek taç hacmi ile CO₂ absorpsiyonu ve PM tutumu, *Gleditsia triacanthos* (Üç dikenli akasya) kuraklığa dayanıklı, yüksek filtreleme kabiliyeti. Yaya alanları ve parklar, alerjen riski düşük ve estetik olan *Tilia tomentosa* (Gümüşi ıhlamur), gölgeleme ve NO₂ absorpsiyon etkisi yüksek *Magnolia grandiflora* (Manolya) geniş yapraklı, kirletici tutumu güçlü, çiçekli ve dekoratif, *Arbutus unedo* (Koca yemiş) hem çalı hem ağaç formu kullanılabilir, dört mevsim yeşil. Refüjler ve ara yollar, düşük bakım gerektiren türler; *Santolina chamaecyparissus* (Lavantin), yer örtücü olarak kuru ortamlarda başarılı, *Thymus vulgaris* (Kekik), aromatik yapısı ile hem estetik hem de biyolojik çeşitlilik katkısı sağlar, *Cotoneaster dammeri* (Dağ muşmulası), düşük formda, partikül tutumu yüksek çalı. Duvar ve dikey yüzeyler, *Trachelospermum jasminoides* (Yıldız yasemin), dört mevsim yapraklı, hava temizleyici, *Campsis radicans* (Acem borusu), gölgeleme, dikey tutunma, çiçekli görsellik, *Humulus lupulus* (Şerbetçi otu), yıllık ama hızlı büyüyen, kısa ömürlü sarılcı [57].

-Bitki Kombinasyonlarının Rolü: Tekil tür performansının yanı sıra çok katmanlı bitkilendirme stratejileri, sinerjik etkiler üretir. Ağaç + çalı + yer örtücü kombinasyonları hem düşük hem yüksek irtifalarda kirletici tutulmasını sağlar. Ağaç altı çalı bitkilendirmeleri, kök koruma ve nem düzenlemesi sağlar. Dikey yeşil + yer

örtücü sistemleri, özellikle dar alanlarda maksimum yüzey sağlar. Ayrıca mikro-iklim özellikleri (rüzgâr yönü, güneşlenme) dikkate alınarak bitkilerin yönlenme ve açıklık-yoğunluk oranları bilimsel olarak modellenmelidir [25].

4.6. Bitki Yerleşim Stratejileri ve Mekânsal Uyum

Kentsel yeşil altyapı uygulamalarında yalnızca uygun bitki türlerinin seçilmesi değil, bu türlerin mekânda nasıl konumlandırılacağı, hangi yoğunlukta, hangi formlarla ve hangi strüktürel düzenle yerleştirileceği de hava kalitesini iyileştirme açısından kritik önemdedir. Bitki yerleşimi, hava akımı yönlendirmesi, kirletici yayılımı yönetimi, mikroiklim düzenlemesi ve maruziyet azaltımı gibi çok boyutlu işlevleri doğrudan etkiler [23]-[25].



Şekil 4.1 (a) bitki örtüsü bariyeri olmayan, (b) bitki örtüsü olan, (c) yeşil duvarlı açık yol konfigürasyonları altında yol kirleticilerinin dağılım modelleri

Şekil 4.1’de Abhijith ve arkadaşları (2017) yapmış oldukları çalışmada sokak kanyonlarında bitkilendirme senaryolarının emisyonlar üzerindeki etkilerini araştırmış ve bunu “a”, “b”, “c” senaryoları ile açıklamışlardır [58].

-Yerleşim Tipine Göre Bitkilendirme Stratejileri: Kentsel yeşil altyapı tasarımında bitkilendirme rejimi, kirletici dispersiyonunu doğrudan etkilemektedir. Lineer (sıralı) bitkilendirme, yol aksına paralel oluşturulan vejetasyon koridorlarını ifade eder. *Platanus orientalis*, *Tilia tomentosa* ve *Populus nigra* gibi sütun formu türlerin tercih edildiği bu sistemlerde, bitki dizilimi rüzgâr akış dinamikleriyle senkronize edildiğinde, kirletici partiküllerin taşınım vektörleri değiştirilerek seyreltme etkisi sağlanabilmektedir. Buna karşın çok katmanlı bitkilendirme stratejisi, ağaç-çalı-yer örtücü hiyerarşisi ile oluşturulan kompleks bir kanopi mimarisi sunar. Bu yapı, dikey ekseninde kesintisiz bir bariyer oluşturarak, farklı partikül çaplarına sahip kirleticilerin (PM fraksiyonlarının) tüm katmanlarda eş zamanlı olarak absorbe edilmesine ve yüzeyde birikmesine (depozisyon) olanak tanır.



Şekil 4.2 Yol kenarındaki bitkilerin hava kirliliği etkilerini azaltmadaki yerleşim modelleri

Şekil 4.2’de Baldauf (2017) yarı açık-dağınık yerleşim (Clustered or staggered), gruplar hâlinde dağınık yerleşim, sıkışık düzende olmadan oluşacak; avantaj ve riskleri göstermiştir [51].

Tablo 4.7 Yol tipine göre yerleşim prensipleri

Yol Tipi	Önerilen Bitki Formasyonu	Hedeflenen Etki
Otoyol refüjü	İğne yapraklı ağaçlar + kalın çalı kuşağı	Gürültü azaltımı, PM _{2.5} tutumu
Yaya aksı	Geniş yapraklı gölge ağaçları + alçak çalı	Gölgeleme, O ₃ ve NO ₂ azaltımı
Kavşak ve dönemeçler	Düşük formda çalı ve yer örtücü bitkiler	Görüş açısı korunumu + PM tutma
Duvar kenarları	Sarılcı/tırmanıcı türler + tabanda çalı	Isı adası etkisini azaltma

Tablo 4.7 yol tiplerine göre bitkilerin hangi senaryolarda ve nasıl katmanlı kullanılacağını ve kullanım şekillerine göre hedeflenen etkileri açıklamaktadır [51].

-Hava Akımı ve Rüzgâr Yönü ile Uyum: Rüzgâr yönü, kirleticilerin yayılmasında belirleyici olduğundan, bitki sıralarının rüzgâr yönüne dik olacak şekilde yerleştirilmesi önerilir. Rüzgâr kırıcı türler (*Cupressus sempervirens*, *Pinus nigra*) rüzgâr perdesi oluşturur. Açıklıklı taç yapılı türler *Acer campestre* (Akçaağaç) ise hava hareketini tamamen kesmeden yavaşlatır. Aini & Shen (2020) tarafından yapılan modelleme çalışmasına göre, yoğun ve kapalı formda dikilmiş ağaçlar egzoz kirleticilerini yaya seviyesinde hapsedebilirken, optimum boşluklarla yerleştirilmiş çok katmanlı sistemler hem hava geçişine izin verir hem de kirletici yayılımını azaltır [25].

-Tür Uyumuna Göre Mekânsal Gruplama: Farklı türlerin birlikte kullanılması hem estetik hem de fonksiyonel çeşitlilik sağlar. Ancak;

- Işık talebi,
- Kök rekabeti,
- Su ihtiyacı,
- Gelişme hızı gibi faktörlerin dengeli olması gerekir.

Tablo 4.8 Ulaşımda kullanılan bazı yol bitkileri

Bilimsel Adı	Yaygın Adı	Kategori	Tohum Tipi	Yaprak Tipi	Kuraklık/Bakım Toleransı
<i>Pinus nigra</i>	Karaçam	Ağaç	Açık	İğne	Yüksek (kuraklığa dayanıklı)
<i>Cupressus sempervirens</i>	Kara selvi	Ağaç	Açık	İğne	Yüksek (kuraklığa dayanıklı)
<i>Taxus baccata</i>	Porsuk Ağacı	Ağaç	Açık	İğne	Orta
<i>Quercus ilex</i>	Saplı meşe	Ağaç	Kapalı	Geniş	Yüksek
<i>Acer campestre</i>	Ova akçaağaç	Ağaç	Kapalı	Geniş	Orta
<i>Platanus orientalis</i>	Doğu Çınar	Ağaç	Kapalı	Geniş	Orta

Platanus acerifolia	London çınarı	Ağaç	Kapalı	Geniş	Orta
Cedrus libani	Lübnan sediri	Ağaç	Açık	İğne	Orta
Morus alba	Beyaz dut	Ağaç	Kapalı	Geniş	Orta
Acer negundo	Akçağaç	Ağaç	Kapalı	Geniş	Yüksek
Laurus nobilis	Defne	Çalı	Kapalı	Geniş	Yüksek
Lavandula angustifolia	Lavanta	Çalı	Kapalı	Geniş	Yüksek
Nerium oleander	Zakkum	Çalı	Kapalı	Geniş	Yüksek
Ligustrum vulgare	Kurtbağrı	Çalı	Kapalı	Geniş	Orta
Cotoneaster dammarii	Dağ muşmulası	Çalı	Kapalı	Geniş	Yüksek
Elaeagnus angustifolia	Çalı iğde	Çalı	Kapalı	Geniş	Yüksek
Forsythia intermedia	Altın çanağı	Çalı	Kapalı	Geniş	Düşük-Orta
Syringa vulgaris	Leylak	Çalı	Kapalı	Geniş	Orta
Viburnum opulus	Kartopu	Çalı	Kapalı	Geniş	Orta
Spiraea vanhouttei	Keçi sakalı	Çalı	Kapalı	Geniş	Orta
Buxus sempervirens	Şimşir	Çalı	Kapalı	Geniş	Orta
Hedera helix	Orman sarmaşığı	Sarılcı	Kapalı	Geniş	Yüksek
Lonicera japonica	Hanımeli	Sarılcı	Kapalı	Geniş	Orta
Parthenocissus quinquefolia	Amerikan sarmaşığı	Sarılcı	Kapalı	Geniş	Yüksek
Trachelospermum jasminoides	Yıldız yasemin	Sarılcı	Kapalı	Geniş	Yüksek
Passiflora caerulea	Çarkıfelek	Sarılcı	Kapalı	Geniş	Düşük
Thymus serpyllum	Yaban kekik	Yer örtücü	Kapalı	Geniş	Yüksek
Sedum spurium	Damkoruğu	Yer örtücü	Kapalı	Geniş	Yüksek
Juniperus horizontalis	Yayılıcı Mazı	Yer örtücü	Açık	İğne	Yüksek
Ajuga reptans	Mayasıl otu	Yer örtücü	Kapalı	Geniş	Orta
Vinca minor	Menekşe	Yer örtücü	Kapalı	Geniş	Orta
Dianthus gratianopolitanus	Karanfil pembesi	Yer örtücü	Kapalı	Geniş	Yüksek

Tablo 4.8’de literatür taramaları sonucu elde edilen veriler ışığında yol bitkilendirmesinde kullanılan bazı türler, bölgeye olan uyumları ile değerlendirilerek oluşturulmuştur.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, kent içi ulaşım kaynaklı emisyonların azaltılmasında yol bitkilendirme stratejilerinin çevresel katkılarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. İstanbul'un en yoğun trafik akışına sahip ulaşım koridorlarından biri olan D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı seçilmiş; böylece hem yüksek emisyon yükü hem de karmaşık kentsel morfolojiye sahip bir alan olması önemli olmuştur. Çalışmada, fiziksel çevre bileşenlerini içeren hava kalitesi, trafik yoğunluğu ve meteorolojik veriler ile bitkisel örtü karakteristikleri kapsamlı biçimde analiz edilmiş; bu veriler ÇKKV teknikleri ve modelleme araçlarıyla entegre edilerek karar destek niteliği taşıyan analitik bir çerçeve oluşturulmuştur. Bu yönüyle çalışma, hem çevresel performansın nicel olarak değerlendirilmesini hem de bitkilendirme stratejilerinin bilimsel temellerle çalışılmasını mümkün kılan disiplinler arası bir yaklaşımı ortaya koymaktadır.

5.1. Çalışma Alanı ve Materyal

Araştırmanın materyal boyutunu hem saha temelli gözlemler hem de ikincil veri kaynaklarından elde edilen çevresel göstergeler oluşturmaktadır. Bu çerçevede kullanılan başlıca materyaller aşağıda özetlenmiştir:

-Hava kalitesi verileri: İstanbul Hava Kalitesi İzleme İstasyonu ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ölçüm ağından temin edilen PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x ve CO değerleri.

-Meteorolojik veriler: Rüzgâr yönü-hızı, sıcaklık ortalamaları, nem dağılımları (MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü) ve açık veri portalları).

-Trafik yoğunluğu verileri: D-100 Karayolu akış hızları, araç tip dağılımı ve trafik hacmi (İBB Ulaşım Yönetim Merkezi).

-Nüfus ve kentleşme göstergeleri: TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) veri tabanları.

-Bitki veri setleri: Tür bazlı ekosistem hizmeti bileşenlerini içeren i-Tree Eco veri tabanı. Değerlendirmeye alınan bitki türleri, Türkiye'de kent içi peyzaj uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ve literatürde hava kalitesi düzenleme potansiyeli kanıtlanmış türlerden oluşturulmuştur. Türler dört ana kategori altında sınıflandırılmıştır:

- Ağaç türleri
- Çalı türleri
- Yer örtücüler
- Sarılıcı ve tırmanıcı türler

Bu materyaller, çalışmanın ekosistem hizmeti potansiyellerini değerlendirmeye yönelik kuramsal çerçevesinin temelini oluşturmuştur.



Şekil 5.1 D100 Karayolu Göztepe Kavşağı batıdan doğuya perspektif

Tez konusunun çalışma sahası olan D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı'na ait perspektif görünüm Şekil 5.1'de verilmiş olup alana ait topografik yapı ve yerleşim planını oluşturmaktadır.

5.2. Yöntemsel Yaklaşım

Çalışmada uygulanan yöntem, veri analitiği, modelleme, mekânsal analiz ve ÇKKV tabanlı karar destek sistemlerinin bir arada kullanıldığı çok bileşenli bir yapıdan oluşmaktadır.

5.2.1. ÇKKV Yöntemleri

Araştırmada, bitki türlerinin çevresel performansını çok boyutlu biçimde değerlendirmek amacıyla hem tekil hem de hibrit yaklaşımlar uygulanmıştır:

DEMATEL: Kriterler arasındaki neden–sonuç ilişkilerini belirlemek, etkileşim matrisini oluşturmak ve sistemdeki etkileyici/etkilenen kriterleri tanımlamak için kullanılmıştır.

SWARA: Uzman görüşlerine dayalı olarak kriterlerin öznel ağırlıklarının belirlenmesinde uygulanmıştır. Bu yöntem, çalışma alanına özgü çevresel koşulların değerlendirilmesini sağlamıştır.

Entropi: Kriterlerin veriye dayalı değişkenliğini esas alarak nesnel ağırlıkları ortaya çıkarmıştır. SWARA ile hibrit kullanımı, karar verme sürecinde dengeleyici bir yapı oluşturmuştur.

TOPSIS: Farklı türlerin ideal çözüme yakınlıklarına göre sıralanması için uygulanmış; en uygun türlerin belirlenmesinde nihai karar mekanizmasını oluşturmuştur.

Kriterler; emisyon tutma kapasitesi, rüzgâr ve gürültü etkileri, estetik değer, toprak toleransı, iklim uyumu, bakım maliyeti, su tutma kapasitesi, vb. çevresel ve mekânsal değişkenler üzerinden tanımlanmıştır.



Şekil 5.2 D100 Karayolu Göztepe Kavşağı üstten görünüm

Şekil 5.2’de çalışma sahasının yakın görünüm ve üstten (uydu) çekimi bulunmakta olup yol ve güzergahları belirgin olarak göstermektedir.

Bu bölümde, ağaç, çalı, yer örtücü ve sarılıcı bitki türlerine ilişkin olarak; DEMATEL, SWARA, Entropi ve TOPSIS gibi yöntemlerin hem bireysel hem de hibrit modelleme yoluyla uygulandığı analizler sunulmuştur.

Her bitki kategorisi için belirlenen alternatif türler, emisyon azaltımı, bakım maliyeti, çevresel uyum, estetik değer gibi çok boyutlu kriterlere göre değerlendirilmiş ve en uygun türlerin sıralaması elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen skorlar grafikler, tablolar ve görsel peyzaj önerileri ile desteklenmiş; Marmara Bölgesi başta olmak üzere dört büyük şehir (İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa) için bölgesel uygulama önerileri geliştirilmiştir. Bu bağlamda, bulgular bölümü hem sayılara dayalı bilimsel analizleri hem de uygulanabilir öneri modellerini bir arada sunarak, çalışmanın somut çıktılarının değerlendirildiği temel bölümdür.

Karmaşık kentsel ve çevresel problemlerin çözümünde, karar vericilerin karşılaştığı en büyük zorluklardan biri, birbirinden farklı ve zaman zaman çelişkili birden fazla kriterin aynı anda değerlendirilmesidir. ÇKKV ya da İngilizce adıyla MCDM (Multi-Criteria Decision-Making) yöntemleri, bu tip problemleri sistematik, sayısal ve objektif biçimde analiz edebilmek amacıyla geliştirilmiş teknik yaklaşımlardır. Bu yöntemler, özellikle ulaşım planlaması, kentsel yeşil altyapı seçimi, yer seçim analizleri, altyapı yatırımları ve çevresel etki değerlendirmeleri gibi alanlarda yoğun biçimde uygulanmaktadır [107].

ÇKKV’de maliyet, çevresel etki, erişilebilirlik, sürdürülebilirlik vb. farklı parametreler eş zamanlı değerlendirilir. Öznel ve nesnel veri birlikte kullanılabilir. Uzman görüşleri, istatistiksel veriler ve saha analizleri entegre edilebilir. Alternatifler karşılaştırılır. Her bir alternatifin toplam performansı belirli ağırlıklarla hesaplanır. ÇKKV sistemleri üç temel bileşene dayanmaktadır. Karar alternatifleri, kriterler ve ağırlıklar [108]-[109]-[110].

1. **Karar Alternatifleri (Options):** Uygulamaya alınabilecek seçenekler (örneğin, farklı ağaç türleri, güzergâhlar, alanlar).
2. **Kriterler (Criteria):** Her bir alternatifin değerlendirilmesinde kullanılan ölçütler (örneğin maliyet, çevresel etki, sürdürülebilirlik, verimlilik).
3. **Ağırlıklar (Weights):** Kriterlerin göreceli önem düzeyi. Bu ağırlıklar uzman görüşlerine, istatistiksel verilere veya entropi gibi matematiksel tekniklere dayanabilir.

ÇKKV'nin amacı, her bir alternatifin bu kriterler altında ne kadar iyi performans gösterdiğini sayısal olarak hesaplayarak en uygun seçeneği veya sıralamayı belirlemektir.

ÇKKV yöntemleri, kullanılan matematiksel yaklaşıma göre klasik, bulanık (fuzzy) ve melez yöntemler olarak üç ana grupta incelenebilir [108]-[109]-[110].

Literatürde ÇKKV teknikleri, temel aldıkları matematiksel algoritmalar ve karar sürecindeki belirsizlikleri işleme biçimlerine göre; geleneksel (deterministik), bulanık (fuzzy) ve bütünleşik (hibrit) yöntemler olmak üzere üç temel kategoride sınıflandırılmaktadır [108-110].

Geleneksel yöntemler grubunda, problemin hiyerarşik bir yapıda modellenmesine olanak tanıyan ve kriterler arası ikili karşılaştırmalar yoluyla ağırlıklandırma yapan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) öne çıkmaktadır. Bu yöntemde, uzman yargılarının güvenilirliği hesaplanan Tutarlılık Oranı (CR) ile sınanmaktadır [109]. Bir diğer yaygın yaklaşım olan TOPSIS ise, alternatiflerin Pozitif İdeal Çözüm ve Negatif İdeal Çözüm noktalarına olan Öklid uzaklıklarını esas alarak sıralama yapmaktadır [68]. Ayrıca VIKOR, ELECTRE ve PROMETHEE gibi yöntemler de alternatiflerin sıralanması ve seçim problemlerinde sıklıkla başvuru alan deterministik araçlardır.

Bulanık (Fuzzy) yöntemler, karar vericilerin yargılarındaki muğlaklığı, belirsizliği ve dilsel değişkenleri modele dahil etmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, kesin sayısal değerler yerine genellikle üçgen veya yamuk bulanık sayılar kullanılarak kriter ağırlıkları ve alternatif değerlendirmeleri daha gerçekçi bir zemine oturtulmaktadır [111].

Son grup olan bütünleşik (melez) yöntemler ise, tek bir yöntemin kısıtlarını gidermek ve analitik gücü artırmak amacıyla birden fazla tekniğin (örneğin AHP ile TOPSIS'in veya Bulanık Mantık ile VIKOR'un) avantajlarının sentezlenmesiyle oluşturulmaktadır.

Tablo 5.1 Uygulama alanları ve değerlendirme kriterleri

Uygulama Alanı	Açıklama
Scooter şarj istasyonu yer seçimi	Kullanım yoğunluğu, erişilebilirlik, güvenlik, altyapı gibi kriterler
Ulaşım koridorlarında ağaçlandırma	Gölgeleme, PM filtreleme kapasitesi, büyüme süresi, maliyet gibi faktörler
Yeşil altyapı önceliklendirmesi	CO ₂ yutak potansiyeli, estetik etki, kullanıcı tercihleri
Kent içi mikromobilité planlaması	Toplu taşıma entegrasyonu, güvenlik, yol kalitesi

Tablo 5.1’de ÇKKV yöntemlerinin kullanım alanları ve hangi amaçlara ulaşmak istendiği verilmiştir.

ÇKKV problemlerinin çözümünde, metodolojinin karmaşıklığına bağlı olarak çeşitli hesaplama araçları ve yazılımlar kullanılmaktadır. Literatür incelendiğinde; AHP ve TOPSIS gibi temel deterministik yöntemlerin uygulanmasında Microsoft Excel ve VBA (Visual Basic for Applications) entegrasyonunun yaygın bir tercih olduğu görülmektedir. Buna karşın, daha karmaşık algoritmik yapıların modellenmesi ve bulanık mantık (fuzzy logic) tabanlı sistemlerin geliştirilmesi süreçlerinde MATLAB, R ve Python gibi yüksek seviyeli programlama dilleri öne çıkmaktadır. Ayrıca, karar vericilere yönelik özelleştirilmiş çözümler sunan Super Decisions, FuzzyMCDM Toolbox ve M-MACBETH gibi paket programlar da karar destek sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Tablo 5.2 ÇKKV yöntemlerinin karşılaştırılması

Özellikler	Klasik Yöntemler	Bulanık Yöntemler	Melez Yöntemler
Belirsizlik	Hayır	Evet	Evet
Hesaplama Zorluğu	Düşük	Orta-Yüksek	Yüksek
Uygulama Alanı	Geniş	Daha geniş	Çok geniş
Veri Türü	Sayısal (Net)	Dilsel + Sayısal	Her ikisi
Uygulama Aracı	Excel vb.	MATLAB, Python	Kombine altyapı

ÇKKV yöntemlerinin karşılaştırılması Tablo 5.2’de verilmiş olup yöntemlerin seçimlerin belirlenmesindeki değerleri ortaya konmuştur.

- **DEMATEL Yöntemi**

DEMATEL yöntemi, 1970’li yıllarda Battelle Memorial Institute tarafından geliştirilmiş, karmaşık sistemlerdeki kriterler arası nedensel ilişkileri belirlemek ve bu ilişkileri sayısal olarak modellemek için kullanılan güçlü bir ÇKKV yöntemidir [112]. Bu yöntem, karar verme sürecinde yalnızca kriter ağırlığını belirlemekle kalmaz; aynı zamanda kriterler arasındaki etkileşim ağı, nedensel (cause) ve etkilenen (effect) boyutları ile birlikte analiz edilir. Bu yöntem, kriterler arası ilişkiler ve etkileşimler doğrudan modellenir (A kriteri B kriterini ne düzeyde etkiliyor?). Diğer ÇKKV yöntemlerinden farklı olarak, kriterler bağımsız değil, bağımlı kabul edilir. Sonuçlar, etki-derece (influence–relation) diyagramı ile grafiksel olarak gösterilir. Özellikle sistem dinamikleri, çevresel analizler, sürdürülebilirlik, ulaşım ve altyapı problemleri gibi çok boyutlu alanlarda etkilidir.

DEMATEL uygulama aşamaları problemin tanımlanması ve kriterlerin belirlenmesi:

Karar problemine ait kriterler/alt kriterler uzman görüşleri, literatür veya gözlemler ışığında belirlenir. Amaç, kriterler arasındaki sebep–sonuç ilişkilerini incelemektir.

1. Uzman Görüşlerinin Toplanması: Seçilen kriterler arasındaki etkileşim düzeyleri uzmanlardan alınan ikili karşılaştırmalar ile belirlenir. Genelde 0–4 ölçeği kullanılır (0 = ilişki yok, 4 = çok güçlü ilişki).

2. Doğrudan İlişki Matrisinin (Direct Relation Matrix) Oluşturulması: Uzmanlardan gelen değerlendirmeler bir araya getirilir ve normalize edilir. Normalizasyon, matrisin tüm elemanlarının 0–1 aralığına dönüştürülmesini sağlar.

3. Toplam İlişki Matrisinin (Total Relation Matrix) Hesaplanması: Bu aşamada hem doğrudan hem de dolaylı etkiler ortaya çıkarılır.

$$T = X(I - X)^{-1} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)’de X normalize edilmiş doğrudan ilişki matrisi, I ise birim matristir.

4. Neden–Sonuç İlişkilerinin Belirlenmesi:

Her bir kriter için:

- ✓ D (row sum): Kriterin diğerlerine olan toplam etkisi.
- ✓ R (column sum): Diğerlerinden aldığı toplam etki.
- ✓ D+R = Kriterin toplam önem düzeyi.
- ✓ D–R = Neden (pozitif) veya sonuç (negatif) gruplarını ayırır.

5. Etki Diyagramının (Cause–Effect Diagram) Oluşturulması: Kriterler yatay ekseninde D+R (önem), dikey ekseninde D–R (neden/sonuç) olacak şekilde grafik üzerinde gösterilir. Bu grafik, hangi kriterlerin sebep (policy driver) ve hangilerinin **sonuç** olduğunu açıkça ortaya koyar.

6. Sonuçların Yorumlanması: Nedensel ilişkiler üzerinden politika, strateji veya planlama kararları alınır. Gerektiğinde diğer ÇKKV yöntemleri (ANP, TOPSIS, AHP vb.) ile entegre edilebilir.

DEMATEL’in ulaştırma alanında en çok sürdürülebilirlik, güvenlik ve risk yönetimi temalarında kullanıldığı görülmektedir [113].

DEMATEL yöntemi, kriterler arası nedensellik ilişkisini açığa çıkarır. Kriterlerin doğrudan ve dolaylı etkileri birlikte analiz edilir. Görselleştirme ile karar vericiler için kolay yorum sağlar. Hibrit sistemlere (Fuzzy DEMATEL, ANP–DEMATEL) uyarlanabilir olması avantajlara sahiptir [112]-[113]-[114].

Tablo 5.3 DEMATEL yönteminin araştırma konusunda kullanımı

Uygulama Alanı	Açıklama
Ulaşım ve Yeşil Alan Planlamasında Kriter Önceliği	“Yaya güvenliği” diğer kriterleri ne ölçüde etkiliyor?
Mikromobilité İstasyonu Konumlandırma	Erişilebilirlik> güvenlik> kullanım yoğunluğu ilişkisi incelenebilir
Yeşil Altyapı Etki Analizi	Bitki türlerinin gölgeleme, maliyet ve hava kalitesi üzerindeki etkileri
Emisyon Kaynaklı Kentsel Etkilerin Haritalanması	Kriterler arası geçiş dinamikleri ortaya çıkarılabilir

Tablo 5.3’te DEMATEL yöntemini kullanım alanları ve seçimlerde kriter belirlemedeki yeri gösterilmiştir.

Literatürde, klasik DEMATEL yönteminin uygulama alanını genişletmek ve analiz yeteneğini artırmak amacıyla çeşitli türev ve melez yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlardan en yaygın olanı, uzman yargılarındaki belirsizliği ve dilsel ifadelerdeki muğlaklığı gidermek amacıyla geliştirilen Bulanık (Fuzzy) DEMATEL yöntemidir. Bu yöntemde, kesin sayısal değerler yerine genellikle üçgen bulanık sayılar kullanılarak değerlendirme süreci daha esnek hale getirilir. Bir diğer önemli yaklaşım olan DEMATEL tabanlı ANP (DANP), kriterler arasındaki nedensel ilişkileri ve geri besleme mekanizmalarını Analitik Ağ Süreci (ANP) ile bütünleştirerek, faktörlerin küresel ağırlıklarının daha hassas hesaplanmasını sağlar. Ayrıca, ağırlıklandırma sürecinde öznel yargıların yarattığı yanlılığı minimize etmek adına DEMATEL ile Entropy veya CRITIC gibi istatistiksel tabanlı yöntemlerin entegrasyonu da sıklıkla tercih edilmektedir. Bu hibrit yapılar, uzman görüşlerine dayalı öznel ağırlıklar ile veriye dayalı nesnel ağırlıkları harmanlayarak daha güvenilir bir karar matrisi sunmaktadır.

- **SWARA Yöntemi**

SWARA yöntemi, karar vericilerin subjektif yargılarını dikkate alarak kriter ağırlıklarını belirlemeye yarayan sezgisel ve pratik bir ÇKKV tekniğidir. 2010 yılında Kersulienne tarafından geliştirilen bu yöntem, özellikle uzman görüşlerine dayalı ağırlıklandırma yapılması gereken durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [115]. SWARA, diğer yöntemlerden farklı olarak uzmanların kriterleri önem sırasına dizmesini ve her bir kriterin bir öncekine göre ne kadar daha az/fazla önemli olduğunu belirtmesini esas alır.

Literatürde SWARA yöntemi, kriter ağırlıklarının uzmanların bilgi birikimi ve deneyimlerine dayalı olarak belirlenmesi amacıyla geliştirilmiş etkin bir yaklaşımdır. Yöntem, özellikle kesin sayısal verilerin (nicel veri) yetersiz olduğu veya problemin doğası gereği nitel değerlendirmelerin ön plana çıktığı karar ortamlarında güçlü bir karar destek aracı olarak işlev görmektedir. SWARA, sağladığı esnek ağırlıklandırma prosedürü nedeniyle, genellikle tek başına kullanılmak yerine; WASPAS, TOPSIS veya VIKOR gibi alternatif sıralama yöntemleriyle entegre edilerek, bütünsel (hibrit) modellerin oluşturulmasında yaygın olarak tercih edilmektedir.

SWARA Yönteminin Adımları [115].

1. Kriterlerin sıralanması: Uzmanlar, tüm kriterleri en önemli olandan en az önemliye doğru sıralar.

2. Görelî önem katsayısının belirlenmesi (s): Her bir kriter için bir öncekine göre görelî azalış seviyesi belirlenir.

3. Katsayı (k) hesaplama:

$$k_i = s_i + 1 \quad (3.1)$$

4. Düzeltme katsayısı (q) hesaplama: İlk kriterin q değeri 1'dir. Sonraki kriterler:

$$q_i = \frac{1}{k^2 \cdot k^3 \cdot \dots \cdot k_i} \quad (4.1)$$

5. Normalize Ağırlıkların Hesaplanması (w): Tüm q değerleri toplanır, her biri bu toplam içindeki payı kadar normalize edilir.

$$w_i = \frac{q_i}{\sum q_i} \quad (5.1)$$

Tablo 5.4 Örnek uygulama alanları

Uygulama Alanı	Örnek Kriterler
Yeşil altyapı türü seçiminde	CO ₂ tutma kapasitesi, bakım maliyeti, yerel iklim uyumu, estetik değer
Scooter istasyonu yer seçiminde	Erişilebilirlik, kullanıcı yoğunluğu, şarj altyapısı, güvenlik
Kentsel ulaşım yatırımı önceliği	Maliyet, çevresel etki, hizmet kapasitesi, halk desteği

SWARA yöntemi öznel bir yöntem olması ve uzman kişilerin puanlaması sonucu ortaya çıkmakta ve Tablo 5.4’de örnek kullanımlar verilmiştir.

SWARA yöntemi, karar probleminin farklı aşamalarını (ağırlıklandırma ve sıralama) en etkin araçlarla çözmek amacıyla sıklıkla diğer ÇKKV teknikleriyle entegre edilerek (hibrit) kullanılmaktadır. Bu bağlamda öne çıkan uygulamalardan biri olan SWARA-WASPAS entegrasyonunda; kriter ağırlıkları SWARA algoritmasıyla saptanırken, alternatiflerin nihai sıralaması WASPAS yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Benzer bir yaklaşımla, SWARA-TOPSIS modellerinde de SWARA, kriterlerin önem düzeylerini belirleyen bir önceliklendirme aracı olarak işlev görür ve elde edilen ağırlık vektörleri TOPSIS algoritmasına girdi olarak aktarılır. Öte yandan, karar vericilerin yargılarındaki kesin olmayan durumları modellemek için yöntemin Bulanık (Fuzzy) SWARA uzantısı geliştirilmiştir.

Tablo 5.5 SWARA yönteminin avantajları ve sınırlılıkları

Avantajlar	Sınırlılıklar
Uygulaması basit	Tamamen öznel uzman yargısına dayanır
Sayısal veri gerektirmez	Kriterler arası ilişkiyi analiz etmez
Kısa sürede sonuç verir	Yalnızca ağırlık belirlemede kullanılır
Excel ile kolay uygulanabilir	

Tablo 5.5’de SWARA yönteminin avantaj ve sınırlılıkları verilmiş olup çalışmamda bu değerler gözönüne alınmıştır.

• Entropi Ağırlıklandırma Yöntemi

Entropi yöntemi, kriter ağırlıklarını veriye dayalı (nesnel) olarak belirlemeye yarayan güçlü bir istatistiksel yöntemdir. Bu yöntemin temelinde bilgi kuramı (information theory) bulunur ve karar matrisindeki belirsizliğin ya da bilginin düzeyi

dikkate alınarak ağırlıklandırma yapılır. Kriterin entropi değeri düşükse, bu kriter karar sürecinde daha fazla ayırım gücüne sahiptir ve dolayısıyla daha yüksek ağırlık alır. Bu durum, verideki varyasyonun (farklılık) bilgi zenginliği yarattığı varsayımına dayanır [116]-[117].

Entropi Yönteminin Aşamaları [116]-[117].

- 1) Karar Matrisi Oluşturulması; Bir karar problemi için m ve n kriterden oluşan bir karar matrisi $X = [x_{ij}]$ tanımlanır. Burada: x_{ij} : i alternatifinin j kritere ilişkin değeri
- 2) Normalize Edilmiş Matrisin Hesaplanması; Değerler normalize edilir

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (2.1)$$

Her kriter için;

$$\sum_{i=1}^m p_{ij} = 1 \text{ olur.} \quad (2.2)$$

- 3) Entropi Değerinin Hesaplanması; Her kriter için entropi değeri,

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln(p_{ij}) \quad (p_{ij} > 0 \text{ için}) \quad (3.1)$$

Burada:

$$k = \frac{1}{\ln(m)} \text{ sabitidir, } e_j \in [0,1] \text{ entropi değeri} \quad (3.2)$$

- 4) Bilgi Faydasının (çeşitlilik derecesi) Hesaplanması;

$$d_j = 1 - e_j \quad (4.1)$$

Bu değer, kriterin karar sürecine katkısını (çeşitliliğini) göstermektedir.

- 5) Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması;

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (5.1)$$

Burada w_j , j kriterin nihai ağırlığının temsil etmektedir. Toplam ağırlıklar:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (5.2)$$

Entropi, kriterlerin doğrudan veriye dayalı olarak ağırlıklandırılması ve uzman görüşüne ihtiyaç duymadan objektif değerlendirme yapılmasını sağlar.

Karar matrisindeki verilerin belirsizliğini ve bilgi içeriğini ölçen Entropi yöntemi, karar vericilerin sübjektif yargılarına ihtiyaç duymadan, tamamen veri setinin içsel dağılımına dayalı nesnel (objektif) ağırlıklar üretmesiyle öne çıkmaktadır. Yöntemin en belirgin avantajı, uzman görüşlerinden kaynaklanabilecek yanlılığı (bias) ortadan kaldırması ve kriterler arasındaki varyasyonu, ayırt edicilik unsuru olarak kullanmasıdır. Bu yaklaşımda, veri değerleri arasında farklılığın az olduğu (homojen) kriterlerin ağırlığı matematiksel olarak düşürülürken, yüksek varyansa sahip kriterlere daha fazla önem atfedilir.

- **TOPSIS Yöntemi**

TOPSIS yöntemi, karar alternatiflerinin “ideal çözüme yakınlık” ve “negatif ideale uzaklık” esasına dayalı olarak sıralandığı bir ÇKKV tekniğidir. Bu yöntem, 1979 yılında Hwang ve Yoon tarafından geliştirilmiş olup özellikle mühendislik, çevre ve peyzaj uygulamalarında yaygın biçimde kullanılmaktadır [129]. Temel varsayım, en iyi alternatif, pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideale en uzak olanıdır.

- **Normalize Karar Matrisi (R)**

Karar matrisi normalize edilerek kriterlerin karşılaştırılabilir hale gelmesi sağlanır:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (1.1)$$

- **Ağırlıklı Normalize Matris (V)**

Her kriter, daha önce belirlenen ağırlıklarla çarpılarak normalize edilmiş matris oluşturulur:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (2.1)$$

- **İdeal ve Negatif İdeal Çözümün Belirlenmesi**

➤ Pozitif ideal çözüm (A⁺): Her kriter için en iyi değer

➤ Negatif ideal çözüm (A⁻): Her kriter için en kötü değer

$$A^+ = \{\max(v_{ij})\}, A^- = \{\min(v_{ij})\} \quad (3.1)$$

- **Uzaklıkların Hesaplanması**

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - A_j^+)^2} \quad (4.1)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - A_j^-)^2} \quad (4.2)$$

- Göreli Yakınlık Değeri (C_i) Hesaplama

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (5.1)$$

$0 \leq C_i \leq 1$ (1'e yakın olan alternatifler en tercih edilebilir)

Bu çalışma kapsamında, bitki türlerinin seçiminde belirleyici olan; emisyon azaltma kapasitesi, bakım maliyeti, rüzgâr engelleme, estetik etki ve trafik güvenliğine katkı kriterlerinin ağırlıklandırılmasında Entropi yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen objektif ağırlık katsayıları, analiz sürecinin bir sonraki aşamasında TOPSIS yöntemine entegre edilerek, bitki türlerinin nihai performans puanlarının hesaplanmasında girdi olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 5.6 Entropi yönteminin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Sınırlılıklar
Tamamen veriye dayanır (objektif)	Uzman yargıları dikkate alınmaz
Hızlı ve hesaplaması kolaydır	Verilerin değişimiyle sonuçlar dramatik biçimde değişebilir
Sayısal karar matrisleri için uygundur	Kriterler arası ilişkiyi analiz etmez

Tablo 5.6'da Entropi yönteminin avantajları ve sınırlılıkları verilmiş olup hibrit yöntem içinde kullanırken bu durumlar değerlendirilmiştir.

ÇKKV literatürü incelendiğinde, karmaşık ve çok boyutlu problemlerin çözümünde tekil yöntemlerin uygulanmasının zaman zaman yetersiz kaldığı görülmektedir. Her bir karar verme tekniği, kendine özgü metodolojik üstünlüklere sahiptir; nitekim bazı algoritmalar kriter ağırlıklandırma sürecinde daha hassas sonuçlar üretirken, diğerleri alternatiflerin sıralanması veya kriterler arası yapısal ilişki analizlerinde daha etkin çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda, farklı yöntemlerin fonksiyonel avantajlarını tek bir modelde birleştirmek amacıyla Hibrit (Bütünleşik) ÇKKV yöntemleri geliştirilmiştir.

Hibrit yaklaşım, iki veya daha fazla ÇKKV tekniğinin entegrasyonu ile daha tutarlı, esnek ve gerçeğe uygun bir karar destek sisteminin oluşturulması süreci olarak tanımlanmaktadır [108]. Bu modeller, yalnızca sayısal analiz gücünü artırmakla kalmaz; aynı zamanda sübjektif uzman yargıları ile nesnel veri setlerini sentezleyerek, karar vericilere çok perspektifli ve bütüncül bir değerlendirme imkanı sunar.

Hibrit Yöntem yapısı iki aşamalıdır:

1. Ağırlıklandırma Aşaması → Kriterlerin önem düzeylerinin belirlenmesi (AHP, SWARA, Entropi, FUCOM, CRITIC).
2. Sıralama / Değerlendirme Aşaması → Alternatiflerin karşılaştırılması (TOPSIS, VIKOR, WASPAS, PROMETHEE).

Tablo 5.7 Yaygın kullanılan hibrit yöntem kombinasyonları

Hibrit Yapı	Açıklama
AHP + TOPSIS	AHP ile kriter ağırlıkları, TOPSIS ile sıralama yapılır. Klasik ama yaygın modeldir.
SWARA + WASPAS	Uzman görüşü temelli ağırlıklandırma, güçlü matematiksel sıralama ile desteklenir.
Entropy + VIKOR	Nesnel veri ile ağırlıklandırma, uzlaşma çözüm arayan VIKOR ile sıralama yapılır.
FUCOM + TOPSIS	Az sayıda karşılaştırma ile güvenilir ağırlıklar, basit ama güçlü sıralama yöntemi
Fuzzy AHP + Fuzzy TOPSIS	Belirsizlik ortamında dilsel değişkenlerle tam bulanıklaştırılmış karar destek modeli
CRITIC + WASPAS	Kriterler arası varyans ve ilişkiyi analiz edip nesnel ağırlıklarla sıralama yapılır

Tablo 5.7’de hibrit kullanımlar ve bunların birbiri ile nasıl ilişkilendirildikleri verilmiştir [108], [113], [117], [110].

Tablo 5.8 Hibrit modelin avantajları ve Sınırlılıkları

Avantajlar	Sınırlılıklar
Yüksek karar güvenilirliği	Yöntem seçimi bilgi ve deneyim gerektirir
Belirsizlik ve karmaşıklıkla başa çıkma kapasitesi	Hesaplama süreci uzayabilir
Farklı veri türleri ile çalışabilir	Hatalı eşleştirmeler yanlış sonuçlara yol açabilir

Tablo 5.8’de hibrit modelin avantaj ve sınırlılıklarını ortaya koymakta ve bu modelin çalışmamız için değerlerin kendi içinde karşılaştırılması için uygunluğunu göstermektedir.

5.2.1.1. Problem Tanımı ve Kriterlerin Belirlenmesi

Kent içi ulaşım bileşenlerinden kaynaklanan emisyonların azaltılması, kentsel yaşam kalitesini artırmak ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamak açısından öncelikli hedeflerden biridir. Özellikle karayolu trafiğine maruz kalan alanlarda, CO₂, NO_x, PM_{2.5} gibi hava kirleticilerin etkilerini azaltmaya yönelik olarak yol kenarı bitkilendirme uygulamaları son yıllarda stratejik bir çözüm haline gelmiştir [17]. Bitkilendirme stratejilerinin etkili olabilmesi için seçilecek bitki türlerinin çok sayıda teknik, ekonomik ve çevresel kriteri aynı anda karşılaması beklenmektedir. Bu durum, bitki türü seçimini karmaşık ve çok kriterli bir karar verme problemi haline getirmektedir. Bu bağlamda çalışma, ÇKKV yöntemleri ile desteklenmiş sistematik bir değerlendirme süreci önermektedir.

Tablo 5.9 ÇKKV kriterleri

Kriter Kodu	Kriter Adı	Açıklama
C ₁	Emisyon Azaltım Kapasitesi	Türün CO ₂ , NO _x ve PM gibi kirleticileri filtreleme etkinliği
C ₂	Tesis Aşaması Maliyet Etkinliği	Fidan temini, dikim kolaylığı, ilk kurulum maliyeti
C ₃	Bakım Maliyeti	Sulama, budama, hastalık kontrolü ve işçilik ihtiyacı
C ₄	Rüzgâr Önleme Yeteneği	Bitki yapısı ile yol kenarındaki rüzgâr hızını düşürme kapasitesi
C ₅	Gürültü Azaltma (Bariyer Özelliği)	Yaprak yoğunluğu ve ses kırıcı doğal yapı
C ₆	Trafik Güvenliği Etkisi	Görüş alanını engellememe, dikkat dağıtmama, reflektif etkiler
C ₇	Tohum/Çiçek Döküntüsü	Mevsimsel tohum, meyve, polen, çiçek dökme yoğunluğu ve etkileri
C ₈	Estetik Değer / Peyzaj Uyumu	Görsel bütünlük, mevsimsel renk değişimi, çevresel estetik katkısı
C ₉	Su Tutma Kapasitesi	Kök yapısıyla toprak nemini tutma ve mikroklimaya katkı
C ₁₀	Toprak Toleransı	Zayıf, kirli veya tuzlu toprak koşullarında yaşayabilme yeteneği
C ₁₁	İklimsel Dayanıklılık	Marmara, Ege ve İç Anadolu ikliminde yaşama başarısı
C ₁₂	Yerel Biyoçeşitliliğe Katkı	Yerel türlerle simbiyotik ilişkisi, kuş ve böceklerle habitat sağlama

Tablo 5.9 literatür taraması, çevresel politika belgeleri, peyzaj uygulamaları ve uzman görüşlerine dayalı olarak 12 kriter belirlenmiştir. Bu kriterler hem emisyon azaltımı hem de işletme sürdürülebilirliği, kentsel uyum ve ekosistem hizmetleri dikkate alınarak yapılandırılmıştır.

Tablo 5.10 Kriter gruplandırmaları

Tematik Grup	İlgili Kriterler
Çevresel Performans	C ₁ , C ₄ , C ₅ , C ₉ , C ₁₂
Ekonomik Etkenler	C ₂ , C ₃
Mekânsal Uyum	C ₆ , C ₇ , C ₈ , C ₁₁
Toprak ve İklim	C ₁₀ , C ₁₁

Tablo 5.10 belirlenen kriterleri kendi içinde gruplandırarak; çevresel performans, ekonomik etkenler, mekânsal uyum, toprak ve iklim olarak değerlendirilmiştir.

5.2.1.2. Alternatif Bitki Türlerinin Tanımlanması

Yol bitkilendirme uygulamalarında kullanılacak bitki türlerinin seçimi, yalnızca estetik bir tercih değil, çevresel fayda, dayanıklılık, maliyet etkinliği ve sürdürülebilirlik gibi birçok bileşeni kapsayan çok boyutlu bir karar problemidir. Bu çalışmada, Türkiye'nin Marmara, Ege ve İç Anadolu bölgelerinde yaygın olarak kullanılan, düşük bakım gereksinimine sahip, yerel iklim koşullarına uyumlu ve emisyon azaltımında etkili türler, alternatifler olarak değerlendirilmiştir.

Bitki türleri, peyzaj planlama, ormancılık ve ekoloji literatürleri ile kamu uygulama envanterleri doğrultusunda 4 ana kategoriye ayrılmıştır: Ağaçlar, çalılar, sarılıcılar ve yer örtücüler.

Gruplama, farklı dikim ihtiyaçları, büyüme formları ve fonksiyonel etkiler (gölgeleme, rüzgâr kesme, hava temizleme) açısından ayrıştırılmıştır. Tüm türler, daha önce belirlenmiş 12 kriter doğrultusunda değerlendirilmek üzere analiz matrisine alınmıştır. Bitki türleri ayrıca 2020–2025 döneminde yayımlanmış akademik kaynaklara dayalı olarak emisyon azaltım kapasitesi, gürültü önleme ve su tutma gibi kriterlerle Excel veri tablosuna işlenmiştir.

5.2.1.3. Verilerin Analize Uygun Hale Getirilmesi

Çalışmada kullanılacak kriterlerin ağırlıklandırılması ve alternatiflerin değerlendirilmesi sürecinde uzman görüşleri alınmıştır. Bu kapsamda peyzaj mimarlığı, şehir ve bölge planlama, çevre mühendisliği ve ormancılık gibi alanlarda uzmanlaşmış akademisyenler ile saha deneyimine sahip uygulayıcıların görüşlerine

başvurulmuştur. Uzmanlardan elde edilen veriler, ÇKKV yöntemleri için gerekli olan ikili karşılaştırmalar, kriter önem dereceleri ve alternatif değerlendirme puanları şeklinde yapılandırılmıştır.

Araştırma verileri, konuyla ilgili farklı disiplinleri temsil eden 10 kişilik bir uzman grubu ile gerçekleştirilen değerlendirmeler neticesinde elde edilmiştir. Katılımcı profili; kentsel peyzaj ve yol ağaştırması konusunda deneyimli peyzaj mimarları, ormancılık ve kırsal planlama pratiğine sahip orman mühendisleri, ulaşım ve altyapı planlaması uzmanı şehir plancıları ile bitki fizyolojisi ve iklim adaptasyonu alanında çalışan ziraat mühendislerinden oluşmaktadır. Uzmanların seçiminde; akademi, kamu ve özel sektör deneyimlerinin homojen bir dağılım göstermesine ve çok boyutlu (multidisipliner) bir bakış açısı sunulmasına özen gösterilmiştir.

Uzmanlar çalışma kapsamında belirlenen 12 kriter sunulmuş; bu kriterler, SWARA yönteminin gerektirdiği şekilde öncelik sırasına göre dizmeleri ve her bir kriterin bir önceki kritere göre göreceli önemini belirtmeleri istenmiştir. Böylece, hem farklı disiplinlerden gelen uzman bakış açıları bir araya getirilmiş hem de kriter ağırlıklarının belirlenmesinde subjektif yargılar sistematik bir yapıya oturtulmuştur.

Uzman görüşlerinin elde edilmesinde, her bir katılımcıya şu bileşenleri içeren bir değerlendirme formu sunulmuştur:

Kriterlerin göreceli önemi: Her bir kriter için 1–5 aralığında bir önem derecesi istenmiştir (1 = çok düşük, 5 = çok yüksek).

Kriterler arası öncelik sırası: Uzmanlardan, 12 kriteri kendi uzmanlık görüşlerine göre en önemli olandan en az önemli olana doğru sıralamaları talep edilmiştir.

Kriterler arası göreceli fark oranı (s_i): Her kriterin, kendisinden önce gelen kritere göre ne ölçüde daha az önemli olduğuna dair göreceli fark oranı (s_i) belirlenmiştir.

Bu veriler, SWARA yönteminin adımları doğrultusunda işlenerek her bir kriter için ağırlık katsayıları elde edilmiş; böylece, tez kapsamında kullanılacak çok kriterli değerlendirme modeline uzman temelli ve sistematik bir ağırlıklandırma yapısı kazandırılmıştır.

Türlere Ait Performans Verileri: Çalışma kapsamında değerlendirilen bitki türlerine ait sayısal performans verileri, farklı kurumsal ve akademik kaynaklardan

derlenerek oluşturulmuştur. Veri toplama sürecinde bir yandan güncel ve bilimsel geçerliliği yüksek çalışmalara dayanılması, diğer yandan da Türkiye'ye özgü tür ve uygulama koşullarının dikkate alınması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda kullanılan temel veri kaynakları şunlardır:

Akademik makaleler: Araştırmanın literatür altyapısı oluşturulurken, güncel ve yüksek etki faktörüne sahip çalışmalara odaklanılmıştır. Bu kapsamda veri seti; 2020–2025 yılları arasında yayımlanmış, Scopus ve Web of Science (WoS) gibi prestijli uluslararası veri tabanlarında endekslenen ulusal ve uluslararası akademik makalelerden derlenmiştir. Tarama sürecinde, alanın en güncel tartışmalarını ve metodolojik yaklaşımlarını yansıtması amacıyla son beş yılın (veya belirtilen dönemin) verileri esas alınmıştır.

Türkiye Orman Genel Müdürlüğü tür veri setleri: Türlerle ait büyüme, bonitet, biyokütle ve ekolojik tolerans bilgileri.

Belediye uygulama envanterleri: İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa büyükşehir belediyelerinin yol ağaçlandırma, refüj bitkilendirme ve park-yeşil alan tür listeleri.

TMMOB (Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği) Peyzaj Mimarları Odası Bitki Kataloğu (2023): Türlerin peyzaj kullanımı, form özellikleri ve kullanım sıklığına ilişkin katalog verileri.

Saha gözlemleri ve foto-dokümantasyon: Bandırma ve Balıkesir örneklem alanlarında gerçekleştirilen yerinde gözlemler, tür performansı, sağlık durumu ve bakım koşullarına ilişkin görsel ve yazılı kayıtlar.

Bu kaynaklardan hareketle her bir tür için aşağıdaki performans göstergeleri tanımlanmıştır:

- CO₂ tutma kapasitesi (kg/yıl),
- Partikül tutma yüzeyi (µg/m²),
- Kuraklık toleransı (nitel ölçekte sınıflandırma),
- Tesis ve bakım maliyeti (₺/yıl),
- Estetik puan (uzman görüşlerine dayalı, 1–5 ölçeğinde ortalama değer).

Elde edilen farklı ölçek ve birimlerdeki tüm veriler, analiz sürecinde karşılaştırılabilirliği sağlamak amacıyla standartlaştırılmış, uygun dönüşümler

yapılarak karar matrisine dönüştürülmüş ve ÇKKV yöntemlerinde kullanılmak üzere analiz için hazır hâle getirilmiştir.

Veri Kalitesi ve Güvenilirliği: Çalışmada kullanılan veri setlerinin geçerlilik ve güvenilirliğini artırmak amacıyla çeşitli kontrol ve doğrulama adımları uygulanmıştır. Öncelikle, her bir bitki türüne ait performans değeri için en az üç bağımsız kaynaktan doğrulama yapılmasına özen gösterilmiştir. Kaynaklar arasında anlamlı farklılıklar bulunduğunda, ilgili tür için uzmanlarla yapılan görüşmeler doğrultusunda uzlaşıya dayalı ortalama değer belirlenmiştir. Eksik veya yalnızca tahmine dayalı olduğu değerlendirilen veriler, uzmanların oybirliği veya oy çokluğu ile yenilenerek veri setine dâhil edilmiştir. Sayısal veriler, karar matrisine aktarılmadan önce min–max kontrolü, aykırı değer analizi ve varyans incelemesi yapılarak veri setindeki uç veya tutarsız gözlemler tespit edilmiştir. Gerekli görülen durumlarda bu gözlemler temizlenmiş veya düzeltilmiş, ardından veriler normalize edilerek ÇKKV yöntemlerinde kullanılabilir hâle getirilmiştir. Tüm bu işlemler, Excel yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiş; veri girişleri, kodlamalar ve hesaplamalar süreç içinde tekrar kontrol edilerek hata payı en aza indirilmeye çalışılmıştır. Böylece hem istatistiksel tutarlılığı yüksek hem de karar verme süreçlerini destekleyici nitelikte bir veri yapısı elde edilmiştir.

5.2.1.4. Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi (DEMATEL, SWARA, Entropi)

ÇKKV problemlerinde, karar kriterlerinin görelî önem düzeylerinin doğru ve tutarlı biçimde belirlenmesi, karar matrisinden elde edilecek sonuçların güvenilirliğini doğrudan etkileyen en kritik adımlardan biridir. Bu nedenle tez kapsamında, kriter ağırlıklarının tek bir yaklaşıma dayandırılması yerine, farklı bakış açılarını yansıtan üç tamamlayıcı yöntem birlikte kullanılmıştır:

DEMATEL: Kriterler arasındaki neden–sonuç ilişkilerini ve etkileşim düzeylerini analiz etmek, hangi kriterlerin “etkileyen” (cause) hangilerinin “etkilenen” (effect) grupta yer aldığını ortaya koymak amacıyla kullanılmıştır.

SWARA: Uzman görüşlerine dayalı olarak kriterlerin öncelik sırasının belirlenmesi ve her bir kriterin bir önceki kritere göre görelî önem farkının (s_i) tanımlanması için kullanılmış; böylece öznel değerlendirmelerin sistematik biçimde ağırlıklara dönüştürülmesi sağlanmıştır.

Entropi Yöntemi: Tamamen nesnel verilere dayanarak, kriterlerin içerdği bilgi yoğunluğunu ve değişkenliğini ölçmek amacıyla kullanılmış; verideki farklılık düzeyine bağlı olarak kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Belirlenen kriterler:

- K1: Emisyon Azaltımı
- K2: Rüzgâr Önleme
- K3: Gürültü Bariyeri
- K4: Estetik Uyum
- K5: Su Tutma Kapasitesi
- K6: Tesis Maliyeti
- K7: İklimsel Dayanıklılık
- K8: Bakım Maliyeti
- K9: Toprak Toleransı
- K10: Trafik Güvenliği Etkisi
- K11: Çiçek/Tohum Döküntüsü
- K12: Yerel Biyoçeşitlilik

Bu üç yöntemin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan hibrit yaklaşım, hem öznel (uzman görüşleri) hem de nesnel (istatistiksel veri yapısı) kaynakları bütünleştirerek, kriter ağırlıklandırma sürecinin daha güvenilir, dengeli ve çok boyutlu bir yapıda kurgulanmasına olanak tanımaktadır. Böylelikle tek bir yöntemin sınırlılıklarına bağımlı kalınmadan, DEMATEL ile etkileşim yapısı, SWARA ile uzman öncelikleri ve Entropi ile veri temelli bilgi düzeyi bir araya getirilmiştir [108].

DEMATEL: ÇKKV yöntemlerinden biridir ve kriterler arasındaki nedensel ilişkileri ortaya koymak için geliştirilmiştir.

Tablo 5.11 Kriterler arası nedensellik değerleri

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12
K1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1
K2	3	0	1	0	0	0	1	0	0	2	0	0
K3	2	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
K4	0	0	1	0	0	2	0	1	0	0	0	1
K5	1	0	0	0	0	2	1	3	1	0	0	0
K6	0	0	0	1	1	0	0	3	1	1	0	2

K7	3	1	1	0	1	0	0	2	2	1	0	1
K8	0	0	0	2	1	1	0	0	0	2	2	0
K9	2	0	0	0	1	2	3	2	0	1	0	0
K10	1	2	1	0	0	0	0	2	1	0	2	0
K11	0	0	0	0	0	1	0	3	0	3	0	0
K12	1	0	0	1	0	1	2	2	0	0	0	0

Tablo 5.11’de kriterlerin kendi içinde nedensellik puanlaması sonucu oluşan değerler ve hangi kriterin hangi kriteri ne derece etkilediği gösterilmektedir.

Bir sistemde yer alan faktörlerin (örneğin bitki seçim kriterleri gibi) birbirini nasıl etkilediğini belirleyerek, hangi kriterlerin neden (etkileyen), hangilerinin sonuç (etkilenen) olduğunu analiz eder. Bu sayede karar sürecinde daha doğru önceliklendirme yapılabilir.

Tablo 5.12 Normalize gösterge değerleri

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12
K1		0,06	0,06		0,06				0,06	0,06		0,06
K2	0,17		0,06				0,06			0,11		
K3	0,11			0,06						0,06		
K4			0,06			0,11		0,06				0,06
K5	0,06					0,11	0,06	0,17	0,06			
K6				0,06	0,06			0,17	0,06	0,06		0,11
K7	0,17	0,06	0,06		0,06			0,11	0,11	0,06		0,06
K8				0,11	0,06	0,06				0,11	0,11	
K9	0,11				0,06	0,11	0,17	0,11		0,06		
K10	0,06	0,11	0,06					0,11	0,06		0,11	
K11						0,06		0,17		0,17		
K12	0,06			0,06		0,06	0,11	0,11				

Tablo 5.13 Toplam puanlar

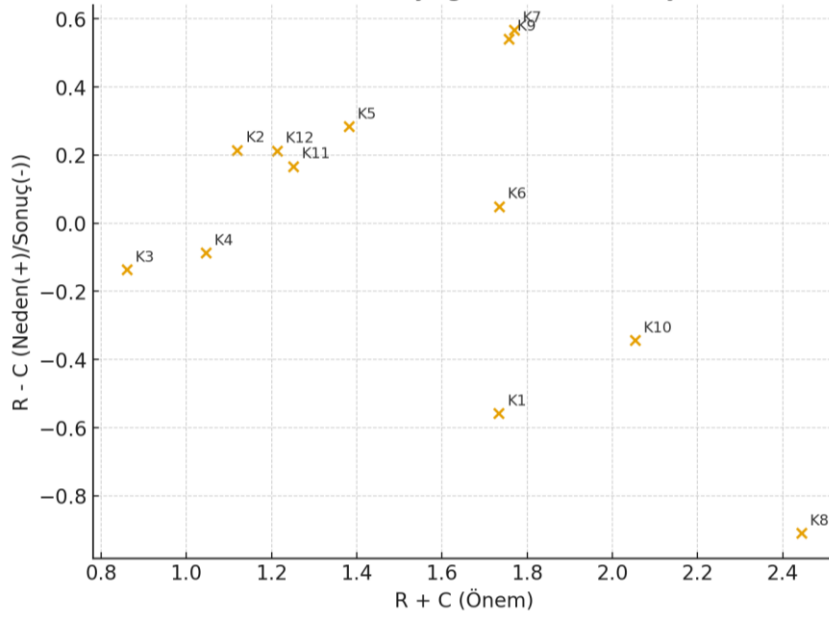
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12
K1	0,04	0,07	0,07	0,01	0,07	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,01	0,06
K2	0,2	0,03	0,08	0,01	0,02	0,01	0,06	0,04	0,03	0,14	0,02	0,02
K3	0,12	0,01	0,02	0,06	0,01	0,01	0	0,02	0,01	0,07	0,01	0,01

K4	0,02	0	0,06	0,03	0,01	0,13	0,01	0,1	0,01	0,03	0,01	0,07
K5	0,09	0,02	0,01	0,04	0,03	0,14	0,07	0,23	0,08	0,05	0,03	0,03
K6	0,03	0,01	0,02	0,09	0,08	0,05	0,03	0,24	0,07	0,1	0,04	0,13
K7	0,23	0,08	0,08	0,03	0,09	0,05	0,04	0,18	0,14	0,12	0,03	0,08
K8	0,02	0,02	0,02	0,13	0,07	0,09	0,01	0,08	0,02	0,15	0,14	0,02
K9	0,17	0,03	0,03	0,03	0,1	0,15	0,19	0,2	0,05	0,12	0,04	0,04
K10	0,1	0,13	0,07	0,02	0,02	0,03	0,02	0,16	0,07	0,07	0,14	0,01
K11	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,08	0,01	0,22	0,02	0,21	0,05	0,01
K12	0,09	0,02	0,02	0,08	0,03	0,08	0,12	0,16	0,03	0,04	0,02	0,03

Tablo 5.14 Nihai sonuçlar

Kriter	R (Etkileyen)	C (Etkilenen)	R+C (Önem)	R-C (Neden+)/Sonuç(-))
K8	0,767159	1,676645	2,443803	-0,90949
K10	0,854644	1,198797	2,05344	-0,34415
K7	1,167989	0,60132	1,769309	0,566668
K9	1,149077	0,607663	1,75674	0,541415
K6	0,891243	0,842403	1,733646	0,04884
K1	0,587638	1,145554	1,733192	-0,55792
K5	0,832704	0,548532	1,381236	0,284171
K11	0,708703	0,541716	1,250418	0,166987
K12	0,712682	0,499888	1,212571	0,212794
K2	0,666767	0,45247	1,119237	0,214296
K4	0,479108	0,566311	1,045419	-0,0872
K3	0,361613	0,498025	0,859638	-0,13641

Tablo 5.12, Tablo 5.13 ve Tablo 5.14’de ÇKKV yöntemlerinden DEMATEL yöntemine ait normalize değerler ve puanlamalar ile nihai sıralama ortaya konmuştur.



Şekil 5.3 DEMATEL yöntemi ile elde edilen neden-sonuç diyagramı

Şekil 5.3’de $R+CR + CR+C$: kriterin toplam önemi; $R-CR - CR-C$: neden (+) veya sonuç (-) konumu. Yatay eksen $R+CR + CR+C$, her bir kriterin sistem içindeki toplam önemini (prominence); dikey eksen $R-CR$, $CR-C$ ise kriterin neden (+) veya sonuç (-) konumunu göstermektedir. Grafikte, pozitif değerlere sahip kriterler sistemin diğer bileşenlerini etkileyen “neden” kriterler; negatif değerlere sahip olanlar ise daha çok etkilenen “sonuç” kriterler olarak yorumlanmaktadır.

Analiz sonucuna göre, K7 (İklimsel Dayanıklılık) ve K9 (Toprak Toleransı), pozitif $R-CR$, $CR-C$ değerleriyle öne çıkarak sistemi yönlendiren ana neden kriterler olarak belirlenmiştir. Bu kriterler hem bitki türlerinin sürdürülebilirliğini hem de uzun vadeli bakım performansını etkileyen belirleyici faktörlerdir. Ayrıca K5 (Su Tutma Kapasitesi) ve K2 (Rüzgâr Önleme) de neden grubunda yer almakta, özellikle bitki seçiminin ekolojik uygunluğunu artırıcı bir rol üstlenmektedir. Buna karşın K8 (Bakım Maliyeti) ve K10 (Trafik Güvenliği Etkisi) yüksek $R+CR + CR+C$ değerlerine rağmen negatif $R-CR$, $CR-C$ skorları ile sonuç kriterleri konumundadır. Bu durum, bakım ve güvenliğin, diğer kriterlerin (özellikle iklimsel dayanıklılık, maliyet ve toprak toleransı) birleşik etkisiyle şekillendiğini göstermektedir. K1 (Emisyon Azaltımı) da benzer şekilde “sonuç” grubunda yer almakta, bu da çevresel faydanın sistemdeki diğer ekolojik ve yapısal faktörlerin bileşkesi olarak

ortaya çıktığını göstermektedir. Elde edilen nedensellik yapısı, sistemin “ekolojik altyapı → uygulama koşulları → sonuçsal çevresel etkiler” şeklinde katmanlı bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur.

SWARA Yöntemi ile Uzman Tabanlı Ağırlıklandırma: SWARA yöntemi, uzman görüşlerine dayalı olarak kriterleri sıralayıp göreceli önem derecelerini belirlemek için kullanılır. EK1’de verilen anket sonuçlarına göre, kriterler aşağıdaki sıralamayla önceliklendirilmiştir.

Tablo 5.15 SWARA uzman görüşleri puanlaması

Kriter	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	Ortalama Sıra
K1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,000
K2	6	5	4	5	9	11	8	3	12	5	6,800
K3	11	10	9	11	12	12	9	4	11	11	10,000
K4	8	8	7	9	11	9	11	5	10	12	9,000
K5	5	3	5	7	5	8	7	6	9	10	6,500
K6	4	2	3	4	2	5	4	7	5	3	3,900
K7	2	4	2	3	3	2	3	8	4	2	3,300
K8	7	7	6	2	4	10	5	9	8	6	6,400
K9	9	6	8	6	6	7	10	10	7	7	7,600
K10	3	9	10	8	7	3	2	2	2	8	5,400
K11	12	11	12	10	10	6	12	11	6	9	9,900
K13	10	12	11	12	9	5	6	12	3	4	8,400

Tablo 5.15’te yer alan puanlama sisteminde; En önemli (1), en az önemli (12) olarak oluşturulmuştur.

Tablo 5.16 SWARA kriter ağırlıklandırması

Sıra	Kriter	Ortalama Sıra	S (öncekine göre fark)	K = S+1	Q (adım katsayısı)	w (normalize)
1	K1	1	0	1	1	0,139
2	K7	2	0,2	1,2	0,833	0,116
3	K10	3	0,1	1,1	0,758	0,105
4	K12	4	0,15	1,15	0,659	0,091
5	K3	5	0,1	1,1	0,599	0,083
6	K2	6	0,05	1,05	0,57	0,079
7	K9	7	0,05	1,05	0,543	0,075
8	K5	8	0,05	1,05	0,517	0,072
9	K4	9	0,1	1,1	0,47	0,065
10	K8	10	0,05	1,05	0,448	0,062

11	K6	11	0,05	1,05	0,427	0,059
12	K11	12	0,1	1,1	0,388	0,054
				ΣQ	7,212	

Tablo 5.16 SWARA yöntemiyle elde edilen bu ağırlıklar, uzman temelli karar yapılarında güvenilir bir taban oluşturmaktadır.

Tablo 5.17 Kriterlerinin normalize edilmiş ağırlıkları

Sıra	Kriter	w (Normalize Ağırlık)
1	K1	0,139
2	K7	0,116
3	K10	0,105
4	K12	0,091
5	K3	0,083
6	K2	0,079
7	K9	0,075
8	K5	0,072
9	K4	0,065
10	K8	0,062
11	K6	0,059
12	K11	0,054
	Toplam	1

Tablo 5.17 ile SWARA yöntemi ile kriterlerin sıralaması uzman görüşlerinin puanlamasının ağırlıklandırılması sonucu ortaya konmuştur. En değerli kriter; K1 (emisyon azaltımı) olmuştur.

Entropi Yöntemi ile Nesnel Ağırlıklandırma: Entropi yöntemi, karar matrisindeki varyasyon miktarını analiz ederek kriterlerin bilgi yoğunluklarına göre ağırlık belirler. Bu yaklaşımda daha fazla farklılık gösteren kriter, karar sürecine daha fazla katkı sağladığı için daha yüksek ağırlık alır.

Tablo 5.18 Ağaçlara ait birinci adım önem puanlamaları

Alternatif	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12
Kriter Tipi	F	F	F	F	F	M	F	M	F	F	M	F
Abies concolor (Göknar)	6	7	6	6	6	6	7	6	6	7	3	6
Acer campestre (Ova Akçaağacı)	4	5	5	7	6	5	7	5	7	7	5	8
Catalpa bignonioides (Katalpa)	3	4	5	7	7	5	6	6	6	6	3	6
Cedrus libani (Lübnan Sediri)	7	7	6	7	6	7	8	6	7	7	4	6
Cupressus sempervirens (Kara Selvi)	7	8	6	6	5	6	8	6	6	8	3	5
Quercus robur (Meşe)	5	6	7	8	7	6	7	6	7	7	5	9
Robinia pseudoacacia (Yalancı Akasya)	6	6	5	6	6	4	7	5	8	6	3	7
Taxus baccata (Porsuk)	6	6	6	7	6	7	7	6	6	7	4	6
Picea abies (Batı Ladini)	7	7	6	6	6	6	6	6	6	7	4	6

Tablo 5.18’da alternatif bitkiler ve 12 kriter için 1–9 ölçeğinde puanlar (yüksek daha iyi) oluşturulmuştur.

F: Fayda

M: Maliyet

Tablo 5.19 Normalize edilmiş alternatif seçimi

Alternatif	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12
Kriter Tipi	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet	Fayda	Maliyet	Fayda	Fayda	Maliyet	Fayda
Abies concolor (Gökmar)	6	7,000	6,000	6,000	6,000	0,167	7,000	0,167	6,000	7,000	0,333	6,000
Acer campestre (Ova Akçaağacı)	4	5,000	5,000	7,000	6,000	0,200	7,000	0,200	7,000	7,000	0,200	8,000
Catalpa bignonioides (Katalpa)	3	4,000	5,000	7,000	7,000	0,200	6,000	0,167	6,000	6,000	0,333	6,000
Cedrus libani (Lübnan Sediri)	7	7,000	6,000	7,000	6,000	0,143	8,000	0,167	7,000	7,000	0,250	6,000
Cupressus sempervirens (Kara Selvi)	7	8,000	6,000	6,000	5,000	0,167	8,000	0,167	6,000	8,000	0,333	5,000
Quercus robur (Meşe)	5	6,000	7,000	8,000	7,000	0,167	7,000	0,167	7,000	7,000	0,200	9,000
Robinia pseudoacacia (Yalancı Akasya)	6	6,000	5,000	6,000	6,000	0,250	7,000	0,200	8,000	6,000	0,333	7,000
Taxus baccata (Porsuk)	6	6,000	6,000	7,000	6,000	0,143	7,000	0,167	6,000	7,000	0,250	6,000
Sütun Toplamı	44,000	49,000	46,000	54,000	49,000	1,436	57,000	1,400	53,000	55,000	2,233	53,000
$p_{ij} = A_{ij} / \text{Sütun Toplamı}$												
Abies concolor (Gökmar)	0,136	0,143	0,130	0,111	0,122	0,116	0,123	0,119	0,113	0,127	0,149	0,113
Acer campestre (Ova Akçaağacı)	0,091	0,102	0,109	0,130	0,122	0,139	0,123	0,143	0,132	0,127	0,090	0,151
Catalpa bignonioides (Katalpa)	0,068	0,082	0,109	0,130	0,143	0,139	0,105	0,119	0,113	0,109	0,149	0,113
Cedrus libani (Lübnan Sediri)	0,159	0,143	0,130	0,130	0,122	0,100	0,140	0,119	0,132	0,127	0,112	0,113
Cupressus sempervirens (Kara Selvi)	0,159	0,163	0,130	0,111	0,102	0,116	0,140	0,119	0,113	0,145	0,149	0,094
Quercus robur (Meşe)	0,114	0,122	0,152	0,148	0,143	0,116	0,123	0,119	0,132	0,127	0,090	0,170
Robinia pseudoacacia (Yalancı Akasya)	0,136	0,122	0,109	0,111	0,122	0,174	0,123	0,143	0,151	0,109	0,149	0,132
e_j (Entropi)	0,809	0,821	0,822	0,824	0,827	0,834	0,828	0,830	0,832	0,825	0,825	0,827
$d_j = 1 - e_j$	0,191	0,179	0,178	0,176	0,173	0,166	0,172	0,170	0,168	0,175	0,175	0,173
Σd_j	0,091	0,085	0,085	0,084	0,082	0,079	0,082	0,081	0,080	0,083	0,083	0,083

Tablo 5.19 ile Entropi yöntemi kullanılarak kriterleri, fayda ve maliyet olarak sınıflandırdıktan sonra nesnel bir yol ile ağırlıklandırmaları yapılmıştır.

Uygulama Süreci:

1. Normalize edilmiş karar matrisi oluşturulur
2. Entropi değerleri (e_i) hesaplanır
3. Bilgi değeri ($d_i = 1 - e_i$)
4. Ağırlıklar: $w_i = d_i / \sum d_i$

Tablo 5.20 Kriter ağırlıkları

Sıra	Kriter	Ağırlık (w_j)
1	K1	0,091
2	K2	0,085
3	K3	0,085
4	K4	0,084
5	K11	0,083
6	K10	0,083
7	K12	0,083
8	K5	0,082
9	K7	0,082
10	K8	0,081
11	K9	0,08
12	K6	0,079
	Toplam	1

Tablo 5.20’de en yüksek varyasyon Emisyon Azaltımı (C_1) ve Rüzgâr önleme, Gürültü Bariyeri (C_2), (C_3) kriterleri gözlemlenmiş, buna karşılık Tesis Maliyeti (C_{12}) ve Toprak Toleransı (C_{11}) gibi kriterlerin varyasyonu daha düşük olmuştur. Her yöntemin avantajlarından yararlanmak amacıyla, üç yöntemin ağırlıkları aşağıdaki şekilde normalize edilerek ortalaması alınmıştır:

- DEMATEL (nedensellik) + SWARA (öznel) + Entropi (nesnel)
- Final ağırlıklar: $(w_1 + w_2 + w_3) / 3$

Bitki Türlerinin Değerlendirilmesi ve Sıralanması

Tablo 5.21 TOPSIS kriter ağırlıkları

Kriter	Ağırlık (w_j)
K6	0,181531033
K11	0,176594119
K2	0,166476753
K9	0,079548323
K7	0,07950375
K4	0,070054817
K3	0,064012759
K1	0,045813613
K8	0,044142694
K12	0,040119078
K10	0,031223986
K5	0,020979074

Uygulanan Bitki Türleri Üzerinde TOPSIS Analizi: Bitki türleri için oluşturulan karar matrisinde her alternatif (bitki türü), önceden belirlenen 12 kriter doğrultusunda puanlandırılmıştır. Kriter ağırlıkları SWARA–DEMATEL–Entropi hibrit yöntemiyle belirlenmiştir.

Tablo 5.22 TOPSIS ağaçlar analizinin sonuçları

Alternatif	Emisyon Azaltımı	Rüzgar Önleme	Gürültü Bariyeri	Estetik Uyum	Su Tutma Kapasitesi	Tesis Maliyeti	İklimsel Dayanıklılık	Bakım Maliyeti	Toprak Toleransı	Trafik Güvenliği Etkisi	Çiçek/Tohum Döküntüsü	Yerel Biyoçeşitliliğe Katkı
Abies concolor (Gökmar)	0,40	0,42	0,39	0,34	0,37	0,34	0,37	0,36	0,34	0,38	0,44	0,33
Acer campestre (Ova Akçağacı)	0,27	0,30	0,33	0,39	0,37	0,40	0,37	0,43	0,39	0,38	0,26	0,44
Catalpa bignonioides (Katalpa)	0,20	0,24	0,33	0,39	0,43	0,40	0,32	0,36	0,34	0,33	0,44	0,33
Cedrus libani (Lübnan Sediri)	0,47	0,42	0,39	0,39	0,37	0,29	0,42	0,36	0,39	0,38	0,33	0,33
Cupressus sempervirens (Kara Selvi)	0,47	0,48	0,39	0,34	0,31	0,34	0,42	0,36	0,34	0,44	0,44	0,28
Quercus robur (Meşe)	0,34	0,36	0,46	0,45	0,43	0,34	0,37	0,36	0,39	0,38	0,26	0,50
Robinia pseudoacacia (Yalancı Akasya)	0,40	0,36	0,33	0,34	0,37	0,50	0,37	0,43	0,45	0,33	0,44	0,39
Taxus baccata (Porsuk)	0,40	0,36	0,39	0,39	0,37	0,29	0,37	0,36	0,34	0,38	0,33	0,33
Norm ($\sqrt{\sum A^2}$)	14,83	16,58	15,23	17,86	16,34	0,50	18,97	0,47	17,86	18,22	0,77	18,08
Ağırlıklı (y _{ij})	0,81	0,82	0,82	0,82	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83

Abies concolor (Göknar)	0,33	0,35	0,32	0,28	0,30	0,28	0,31	0,30	0,28	0,32	0,36	0,27
Acer campestre (Ova Akçağacı)	0,22	0,25	0,27	0,32	0,30	0,34	0,31	0,35	0,33	0,32	0,22	0,37
Catalpa bignonioides (Katalpa)	0,16	0,20	0,27	0,32	0,35	0,34	0,26	0,30	0,28	0,27	0,36	0,27
Cedrus libani (Lübnan Sediri)	0,38	0,35	0,32	0,32	0,30	0,24	0,35	0,30	0,33	0,32	0,27	0,27
Cupressus sempervirens (Kara Selvi)	0,38	0,40	0,32	0,28	0,25	0,28	0,35	0,30	0,28	0,36	0,36	0,23
Quercus robur (Meşe)	0,27	0,30	0,38	0,37	0,35	0,28	0,31	0,30	0,33	0,32	0,22	0,41
Robinia pseudoacacia (Yalancı Akasya)	0,33	0,30	0,27	0,28	0,30	0,42	0,31	0,35	0,37	0,27	0,36	0,32
Taxus baccata (Porsuk)	0,33	0,30	0,32	0,32	0,30	0,24	0,31	0,30	0,28	0,32	0,27	0,27
İdeal + (y^*_j)	0,38	0,40	0,38	0,37	0,35	0,42	0,35	0,35	0,37	0,36	0,36	0,41
İdeal - (y^-_j)	0,16	0,20	0,27	0,28	0,25	0,24	0,26	0,30	0,28	0,27	0,22	0,23

Tablo 5.21 ve Tablo 5.22 TOPSIS yöntemiyle yapılan analiz sonucunda; Ağaç türlerinin yüksek CO₂ ve PM tutma kapasitesi ile öne çıktığı. Çalı ve sarılıcı türlerin gürültü bariyeri ve estetik katkı yönünden avantajlı olduğu, yer örtücüler ise su tutma ve düşük bakım ihtiyacı ile değerlendirmede etkili olduğu saptanmıştır.

Tablo 5.23 TOPSIS alıllar analiz sonuçları

Sıra	alı Türü	S+	S-	CC Yakınlık)
1	Nerium oleander (Zakkum)	0,0247	0,0336	0,5764
2	Juniperus chinensis (Ardıç)	0,0324	0,0297	0,4777
3	Elaeagnus angustifolia (İğde alı)	0,036	0,0272	0,4306
4	Cotoneaster dammeri (Dağ Muşmulası)	0,0362	0,0263	0,4214
5	Pinus mugo (Dağ amı)	0,0329	0,0228	0,4096
6	Callistemon laevis (Fırça alı)	0,0313	0,0181	0,3661
7	Forsythia intermedia (Altınanak)	0,0373	0,0163	0,3043
8	Ilex aquifolium (oban Püskülü)	0,0366	0,0156	0,2985
9	Spiraea vanhouttei (Keçi sakalı)	0,0374	0,0153	0,2898
10	Viburnum opulus (Kartopu)	0,048	0,0059	0,109

Tablo 5.23 TOPSIS analiz sonucunda alıllara ait nihai tercih sıralamasını oluşturmakta ve bu tabloya göre Nerium oleander birinci sırayı almıştır.

Tablo 5.24 TOPSIS yerörtücü ve sarılıcılar analiz sonuçları

Sıra	Tr (Latince)	Türkçe Adı	Form	S+	S-	CC ²
1	Parthenocissus quinquefolia	Amerikan sarmaşığı	Sarılıcı	0,055	0,173	0,758
1	Hedera helix	Orman sarmaşığı	Sarılıcı	0,055	0,173	0,758
3	Lonicera japonica	Hanımeli	Sarılıcı	0,094	0,097	0,507
4	Trachelospermum jasminoides	Yıldız yasemin	Sarılıcı	0,101	0,097	0,490
5	Passiflora caerulea	arkıfelek	Sarılıcı	0,101	0,096	0,487
6	Thymus serpyllum	Yaban kekiği	Yerörtücü	0,153	0,069	0,312
7	Sedum spurium	Damkoruğu	Yerörtücü	0,172	0,067	0,280
8	Ajuga reptans	Mayasıl otu	Yerörtücü	0,157	0,036	0,185
9	Dianthus gratianopolitanus	Karanfil pembesi	Yerörtücü	0,169	0,031	0,153

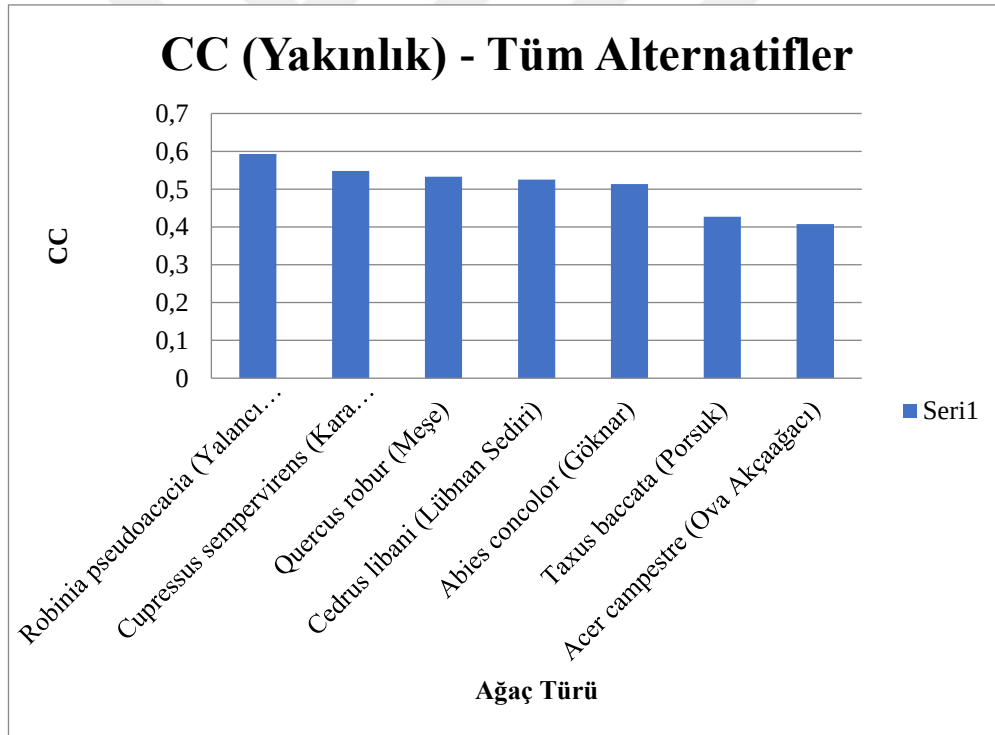
En yüksek performanslı grup (ncelikli türler); Tablo 5.24'te *Parthenocissus quinquefolia* ve *Hedera helix* (CC = 0,758). TOPSIS'e göre eşit düzeyde en uygun türler. Özellikle yol kenarı duvarlar, istinatlar, bariyerler, gürültü perdesi yüzeyleri için: Yüksek PM tutma, Yıl boyu yeşil kalma (zellikle *Hedera helix*). Görsel bariyer ve gürültü yutma işlevleri açısından, n³celikli olarak değerlendirilebilir. Sanayi–konut geçiş zonları, otoyol kenarları ve yoğun trafik akslarında “yeşil perde/yeşil duvar” kurgusunda birincil adaylar.

² CC (closeness coefficient) değerı 1'e yaklaştıkça tür, ideal çözüme o kadar yakın; 0'a yaklaştıkça ise zayıf alternatif olarak yorumlanır.

TOPSIS sonuçları, yol kenarı bitkilendirmesinde “hangi türü nereye ve hangi öncelikle koymalıyım?” sorusuna doğrudan yanıt verebilecek niteliktedir.

5.2.1.5. Alternatif Bitki Türlerinin Performans Analizi

Kentsel alanlarda hava kalitesi, estetik, bakım maliyeti ve biyolojik çeşitlilik gibi çok boyutlu gereksinimleri karşılayabilecek uygun bitki türlerinin seçimi, sürdürülebilir peyzaj planlamasının en kritik adımlarından biridir. Bu bağlamda, çalışmada değerlendirilen alternatif bitki türleri (ağaç, çalı, yer örtücü ve sarılıcılar), 12 kriter çerçevesinde analiz edilmiştir. Değerlendirme sürecinde SWARA ve Entropi yöntemleriyle kriter ağırlıkları belirlenmiş, ardından TOPSIS yöntemi ile nihai skor ve sıralamalar oluşturulmuştur.



Şekil 5.4 Ağaçlar tüm alternatifler TOPSIS puan sıralaması

Şekil 5.4’de ağaçların TOPSİS analizi sonucu nihai sıralamasına ait grafik oluşturulmuş ve birinci sırayı Robinia pseudoacacia ağacı almıştır.

Tablo 5.25 Ağaçlar TOPSIS puan sıralaması

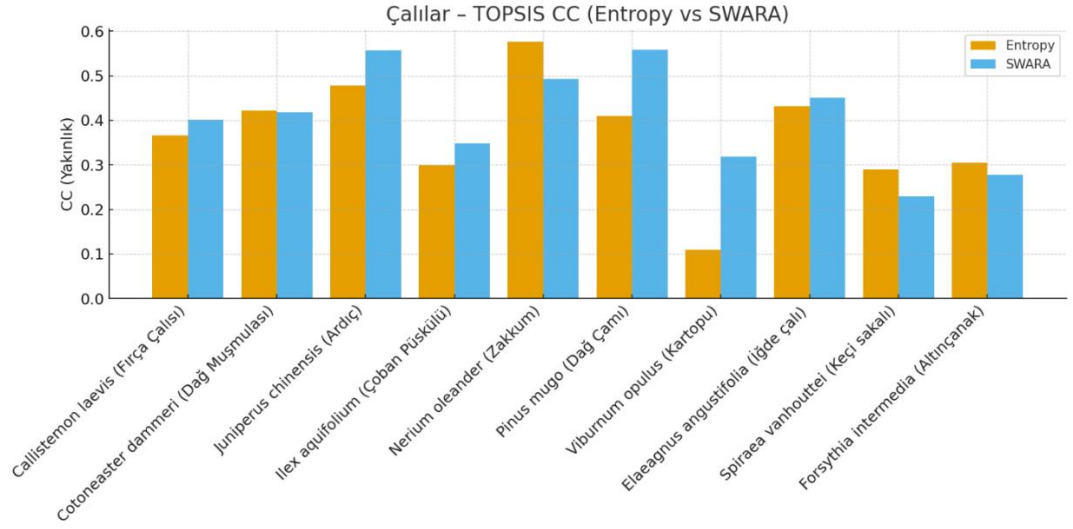
Alternatifler	S+ (Uzaklık +)	S- (Uzaklık-)	CC = S- / (S++S-)	Sıra
Abies concolor (Gökmar)	0,271969782	0,287295462	0,51370162	5
Acer campestre (Ova Akçaağacı)	0,317876773	0,218556086	0,407424866	7
Catalpa bignonioides (Katalpa)	0,392932365	0,210513271	0,34885209	8
Cedrus libani (Lübnan Sediri)	0,277635143	0,306625946	0,524809801	4
Cupressus sempervirens (Kara Selvi)	0,294805582	0,357349809	0,547951936	2
Quercus robur (Meşe)	0,267488528	0,305407029	0,533093729	3
Robinia pseudoacacia (Yalancı Akasya)	0,232322759	0,338530436	0,593025385	1
Taxus baccata (Porsuk)	0,309533132	0,230418518	0,426739168	6

Tablo 5.25 ağaçların TOPSIS sıralamalarını ağırlıklandırılmış hibrit ortalamaları ile oluşturulmasını göstermektedir. Analiz kapsamındaki kriterler: Emisyon Azaltımı, Rüzgâr Önleme, Gürültü Bariyeri Estetik Uyum, Su Tutma Kapasitesi, Tesis Maliyeti, İklimsel Dayanıklılık, Bakım Maliyeti, Toprak Toleransı, Trafik Güvenliği Etkisi, Çiçek/Tohum Döküntüsü, Yerel Biyoçeşitliliğe Katkı olmak üzere on iki kriter üzerinden değerlendirilmiştir.

Tablo 5.26 Çalılar TOPSIS puan sıralaması

Çalı Türü	CC (Entropy)	Sıra (Entropy)	CC (SWARA)	Sıra (SWARA)	Sıra Farkı (SWARA-Entropy)
Nerium oleander (Zakkum)	0,5764	1	0,4925	3	2
Juniperus chinensis (Ardıç)	0,4777	2	0,5564	2	0
Elaeagnus angustifolia (İğde çalı)	0,4306	3	0,4501	4	1
Cotoneaster dammeri (Dağ Muşmulası)	0,4214	4	0,4182	5	1
Pinus mugo (Dağ Çamı)	0,4096	5	0,5582	1	-4
Callistemon laevis (Fırça Çalısı)	0,3661	6	0,4017	6	0
Forsythia intermedia (Altınçanak)	0,3043	7	0,2768	9	2
Ilex aquifolium (Çoban Püskülü)	0,2985	8	0,3479	7	-1
Spiraea vanhouttei (Keçi sakalı)	0,2898	9	0,2299	10	1
Viburnum opulus (Kartopu)	0,109	10	0,3184	8	-2

Tablo 5.26 TOPSİS analizleri sonucu çalılara ait nihai sıralamalar oluşturulmuş ve kullanılan ÇKKV yöntemlerinin karşılaştırmaları yapılmıştır.



Şekil 5.5 Çalılar Entropy / SWARA karşılaştırmaları

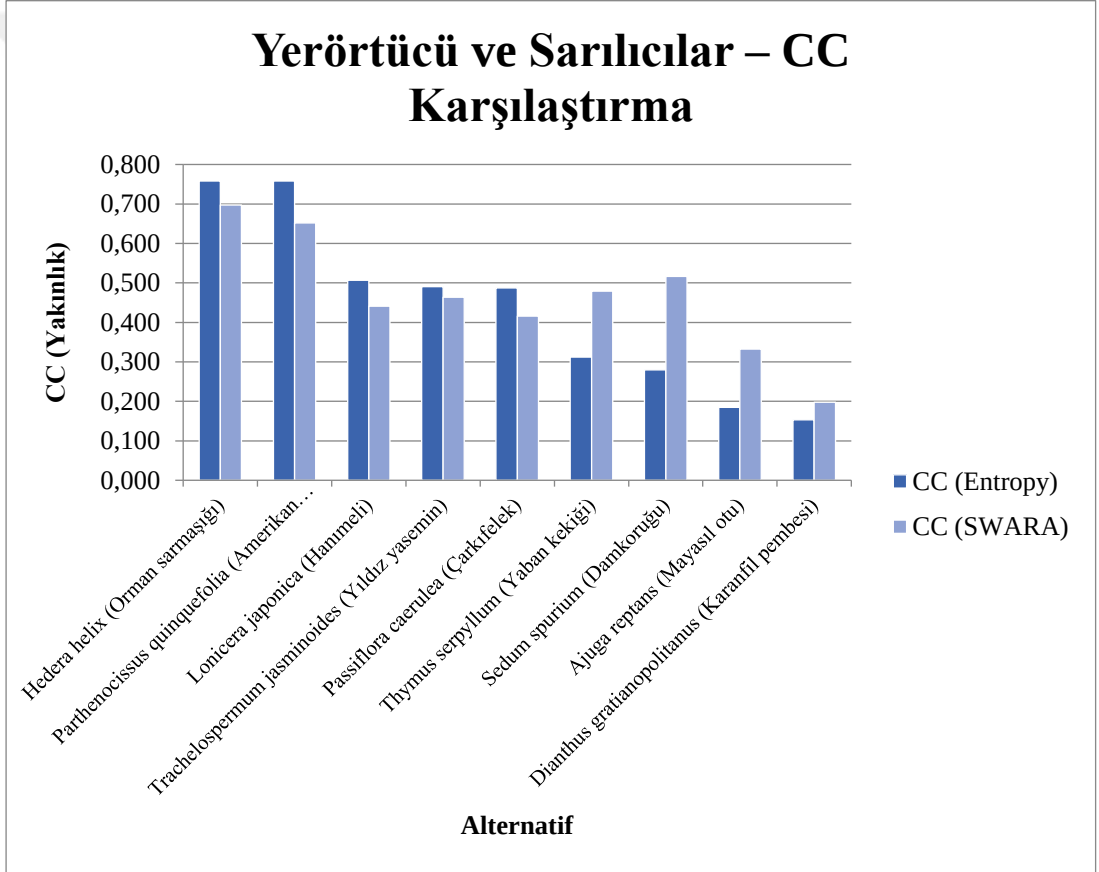
Analizler sonucunda hem bireysel performans kriterleri açısından hem de bütünsel sürdürülebilirlik katkısı açısından yüksek puan alan türlerin çalışma alanlarının iklim koşullarıyla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.5 ile de Entropi, SWARA karşılaştırmaları yapılmış ve kriterlerin ağırlıklandırılması sonucu oluşan değerlerin yakınlıkları gösterilmiştir.

Tablo 5.27 Yer örtücü ve sarılıcılar TOPSIS puanlaması

Alternatif	CC (Entropy)	Sıra (Entropy)	CC (SWARA)	Sıra (SWARA)	Sıra Farkı (SWARA-Entropy)
Hedera helix (Orman sarmaşığı)	0,758	1	0,697	1	0
Parthenocissus quinquefolia (Amerikan sarmaşığı)	0,758	2	0,652	2	0
Lonicera japonica (Hanımeli)	0,507	3	0,441	6	3
Trachelospermum jasminoides (Yıldız yasemin)	0,490	4	0,463	5	1
Passiflora caerulea (Çarkifelek)	0,487	5	0,416	7	2
Thymus serpyllum (Yaban kekiğı)	0,312	6	0,479	4	-2

Sedum spurium (Damkoruğu)	0,280	7	0,516	3	-4
Ajuga reptans (Mayasıl otu)	0,185	8	0,332	8	0
Dianthus gratianopolitanus (Karanfil pembesi)	0,153	9	0,198	9	0

Tablo 5.27 ve Şekil 5.6 yerörtücüler ve sarılıcılara ait nihai sonuçları göstermekte ve kullanılan ÇKKV yöntemlerinin birbiri ile kıyaslamalarını içermektedir.



Şekil 5.6 Yerörtücü ve sarılıcılara ait TOPSIS sıralaması

ÇKKV yöntemleri kullanılarak yapılan sırlama sonucunda ağaçlarda; Robinia pseudoacacia, çalılarda; Nerium oleander ve sarılıcılarda, Hedera helix türleri hem fiziksel hem de görsel etkileri bakımından kent içi ulaşım koridorlarında kullanılacak en ideal türler olarak öne çıkmıştır.

5.2.2. Modelleme ve Simülasyon

Bitki türlerinin hava kirleticilerini tutma performansını değerlendirmek amacıyla uluslararası kabul gören i-Tree Eco simülasyon modeli kullanılmıştır. Model aracılığıyla:

- CO₂ depolama ve yıllık karbon tutumu,
- PM₁₀/PM_{2.5} filtreleme kapasitesi,
- NO₂, SO₂, O₃ absorpsiyonu,
- Yaprak alan indeksi (LAI),

Ekosistem hizmeti birim değerleri, nicel olarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, bitkisel materyalin emisyon azaltımındaki etkilerini bilimsel olarak karşılaştırmayı mümkün kılmıştır.

5.2.3. CBS (GIS) Tabanlı Mekânsal Analizler

Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS-Geographic Information System) aracılığıyla çalışma alanının mekânsal bileşenleri detaylı biçimde incelenmiştir:

- Mevcut yeşil alanların dağılımı
- Yol kenarı boşluklarının belirlenmesi
- Bitkilendirme yapılabilir potansiyel alanlar
- Ulaşım altyapısı–bitki örtüsü etkileşim yüzeyleri
- Rüzgâr yönü ve hava akımı analizleri

Bu sonuçlar, bitkilendirme stratejisinin mekânsal uygulanabilirliğini ortaya koymak amacıyla görselleştirilmiştir.

Çalışma yalnızca İstanbul ile sınırlı tutulmamış; Türkiye'nin dört büyük metropolü olan Ankara, İzmir ve Bursa için karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. Bu değerlendirmede hava kalitesi göstergeleri, kent içi ulaşım politikaları ve mevcut yeşil altyapı planları dikkate alınmıştır.

- İstanbul: Trafik yoğunluğu, kıyı etkisi ve partikül madde birikimi nedeniyle referans şehir olarak ele alınmıştır.

- Ankara: Karasal iklim koşulları, yüksek kış emisyonları ve don toleransının önemli olduğu bitki türleri önceliklendirilmiştir.

- İzmir: Akdeniz iklimi, yaz kuraklığı ve su yönetimi politikaları bitkisel tercihleri şekillendirmiştir.

- Bursa: Sanayi bölgeleri ve topoğrafyanın etkisiyle hava sirkülasyonu farklılık göstermekte; mikroklimatik etmenler bitkilendirme stratejilerini doğrudan etkilemektedir.

Bu karşılaştırma, önerilen türlerin yalnızca İstanbul’da değil, bölgesel ölçekte uygulanabilirliğinin sınanmasına olanak tanımıştır.



6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma, kent içi ulaşım sistemlerinden kaynaklanan hava kirleticilerinin azaltılmasında bitkilendirme temelli yeşil altyapı uygulamalarını ÇKKV yöntemleriyle sistematik olarak incelemeyi amaçlamıştır. Çalışma kapsamında, bitki türü seçiminin çevresel, yapısal ve ekonomik kriterler temelinde bilimsel bir çerçevede gerçekleştirilmesi hedeflenmiş; karar verme sürecine nicel ve nitel verilerin birlikte ele alındığı çok boyutlu bir analiz modeli geliştirilmiştir.

6.1. ÇKKV ile Bitki Seçimi Sıralamaları

Çalışma İstanbul ili sınırlarında yer alan D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı üzerinde kurgulanmış; ancak elde edilen analiz ve değerlendirmeler, yalnızca bu kavşakla sınırlı kalmamış, İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa gibi Türkiye'nin dört büyük kentinde farklı mekânsal, iklimsel ve morfolojik koşullar altında yeşil altyapı planlamasının hava kalitesi üzerindeki etkileride analiz edilmiştir.

Çalışmanın uygulama boyutunda, 2020–2025 yılları arasında yayımlanmış güncel literatür, ulusal ve uluslararası raporlar ile istatistiksel veriler taranarak karar verme sürecine bilimsel dayanak sağlanmıştır. Bu kapsamda, farklı bitki formlarına (ağaç, çalı, yer örtücü ve sarılıcı) ait 32 farklı bitki türü, 12 kriter doğrultusunda değerlendirilmiştir. Söz konusu kriterler arasında emisyon azaltım kapasitesi, iklimsel dayanıklılık, bakım maliyeti, rüzgâr ve gürültü bariyeri etkisi, estetik katkı, kuraklık toleransı, kök yapısı ve yerleşim uygunluğu gibi ölçütler yer almaktadır.

Ağırlıklandırma sürecinde, DEMATEL yöntemiyle uzman görüşlerine dayalı önceliklendirme yapılmış ve Entrophy yöntemi aracılığıyla karar matrisindeki bilgi içerikleri ölçülmüştür. Böylece, öznel ve nesnel veri kaynaklarının bütünleştirildiği hibrit bir ağırlıklandırma modeli olan TOPSIS yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamlı analiz süreci sonucunda, farklı bitki türlerinin ulaşım koridorlarında hava kalitesine etkileri, tür bazında performans indeksleri ve senaryo düzeyinde uygulama potansiyelleri nicel olarak ortaya konmuştur. Bulgular hem tür seçiminde hem de yeşil altyapı tasarımında işlevsel, veri temelli ve yerel koşullara duyarlı bir yaklaşım geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Tablo 6.1 Bitki seçiminde ÇKKV yöntemlerinin kullanılması sonucu nihai sıralama

Grup	Birinci	CC(Yakınlık)
Ağaçlar	Robinia pseudoacacia (Yalancı Akasya)	0,7
Yerörtücü & Sarılıcalar	Hedera helix (Orman sarmaşığı)	0,75
Çalılar	Nerium oleander (Zakkum)	0,57

Tablo 6.1’de özetlenen analiz sonuçları incelendiğinde, hibrit ÇKKV (DEMATEL-SWARA-TOPSIS) modeli ile gerçekleştirilen ağırlıklandırma ve sıralama işlemleri neticesinde her bitki formuna ait en yüksek performans skoruna (CC) sahip türlerin ayrıştığı görülmektedir. Elde edilen yakınlık katsayılarına göre; ağaç formunda 0,70 skor değeri ile *Robinia Pseudoacacia (Yalancı Akasya)*, yer örtücü ve sarılıcı grubunda 0,75 skorla *Hedera Helix (Orman Sarmaşığı)* ve çalı grubunda 0,57 skorla *Nerium Oleander (Zakkum)* çalışma sahası için en optimal türler olarak tespit edilmiştir.

Bu sıralamanın oluşumunda, modelin yalnızca emisyon azaltım kapasitesi veya estetik değer gibi tekil değişkenlere odaklanmaması; aksine bakım maliyetleri, trafik güvenliği, tohum/çiçek döküntüsü riski, iklimsel tolerans ve biyoçeşitlilik katkısı gibi çok boyutlu sürdürülebilirlik parametrelerini bütünlük bir yapıda değerlendirmesi belirleyici olmuştur. Dolayısıyla ulaşılan bu sonuçlar, tezin yalnızca çevresel değil; aynı zamanda ekonomik uygulanabilirlik ve kentsel işlevselliği de kapsayan bütüncül bir değerlendirme çerçevesi sunduğunu kanıtlamaktadır.

-Türkiye genelinde incelenen şehirler bazında:

Bu çalışma, D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı örneği üzerinden yürütülmekle birlikte, geliştirilen karar destek modeli ve bitki türü seçimi kriterleri Türkiye'nin farklı büyükşehirlerine de uygulanabilir nitelikte olması yönüyle İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa illeri özelinde karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır.

-İstanbul özelinde elde edilen bulgular, kentin yoğun taşıt trafiği, yüksek yapılaşma oranı ve oluşan iklim mikro etkileri nedeniyle, özellikle geniş yapraklı, yüksek partikül tutma kapasitesine sahip ağaç türlerine öncelik verilmesi gerektiğini göstermektedir. Yaprak yüzey alanı geniş ve yılın büyük kısmında aktif fotosentetik performans sergileyen türlerin, özellikle ana arterler ve viyadük çevrelerinde etkin sonuçlar üreteceği değerlendirilmektedir.

-Ankara, kurak iklim özellikleri, düşük yıllık yağış miktarı ve yeni gelişen yerleşim alanlarında yaygınlaşan sert peyzaj uygulamaları nedeniyle, düşük su ihtiyacına sahip, kuraklığa dayanıklı, aynı zamanda düşük bakım gereksinimi olan bitki türlerinin önceliklendirilmesini gerekli kılmaktadır. Özellikle çalı ve yer örtücü formların kullanımı, bu tür bölgelerde çevresel performansı artırabilirken aynı zamanda bakım yükünü azaltmaktadır.

-İzmir, son yıllarda yeşil ulaşım politikaları ile kent içi bisiklet yolları ve yaya öncelikli alanların artırılmasına yönelik stratejilerle dikkat çekmektedir. Bu doğrultuda, kıyı iklimi koşullarına dayanıklı, tuzluluğa ve rüzgâra toleranslı çalı ve sarılcı türlerin, kent içi ulaşım koridorlarında doğru yönlendirme ile kullanılabileceği öngörülmektedir. Ayrıca, kentsel rüzgâr akımlarından faydalanılarak hava kalitesinin iyileştirilmesinde düşük yükseklikte hızlı gelişen türlerin stratejik kullanımı önerilmektedir.

-Bursa hem doğal yeşil dokusu hem de yoğun sanayi faaliyetleri ile ön plana çıkan bir kenttir. Özellikle odetoplu taşıma odaklı ana ulaşım koridorlarında, hava kirleticilerin pasif filtrasyonuna katkı sağlayacak yoğun çalı ve yer örtücü kuşaklar ile ses tampon bölge işlevi görebilir.

Bu karşılaştırmalı değerlendirme, geliştirilen modelin yalnızca örneklem alanı olan Göztepe Kavşağı ile sınırlı olmadığını; Türkiye genelinde farklı kentlerde yerel iklim, kentleşme deseni, ulaşım yoğunluğu ve bitki türlerinin adaptasyon kapasitesi gibi değişkenler dikkate alınarak ölçeklenebilir ve yerelleştirilebilir bir uygulama stratejisi sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu yönüyle model, ulusal düzeyde politika geliştirme, yeşil ve yerel yönetimlerin karar destek süreçlerinin güçlendirilmesi için bilimsel bir temel oluşturmaktadır.

Bu çalışma, kent içi ulaşım sistemlerinin çevresel etkilerini azaltmak amacıyla geliştirilen bitkilendirme tabanlı çözümlerin sistematik olarak analiz edilmesini hedeflemiştir. Özellikle D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı çevresinde yapılan yerel analiz, Türkiye'deki kentsel ulaşım koridorlarında yeşil altyapı uygulamalarının optimizasyonuna yönelik çıkarımlarla bütünleştirilmiştir.

Araştırma sürecinde kullanılan ÇKKV yöntemleri, bitki türlerinin yalnızca çevresel katkılarına değil, aynı zamanda maliyet etkinliği, bakım gerekliliği, kentsel estetik katkısı, biyolojik çeşitliliğe etkisi ve ulaşım güvenliği üzerindeki potansiyel

rollerine de ışık tutmuştur. Bu yönüyle tez, klasik peyzaj tercih yaklaşımlarının ötesine geçerek çok boyutlu ve veri temelli bir tür seçimi modeli önermektedir.

Analiz sürecinde, Türkiye'de ve dünyada 2020–2025 yılları arasında yayımlanmış akademik yayınlar, yönetmelikler ve saha uygulamaları temel alınarak, 12 farklı kriter belirlenmiş ve bu kriterlere göre 32 alternatif bitki türü (ağaç, çalı, yer örtücü, sarılıcı) değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıkları, DEMATEL, SWARA ve Entropi gibi yöntemlerin hibrit olarak entegre edilmesiyle belirlenmiş, sıralamalar TOPSIS yöntemiyle elde edilmiştir.

Ulaşılan bulgular, belirli türlerin (*Robinia pseudoacacia*, *Nerium oleander*, *Hedera helix*) birden fazla kriterde dengeli performans gösterdiğini ve çalışma sahası başta olmak üzere Türkiye'nin büyükşehirlerinde yaygınlaştırılabilir olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca çalışma, her bitki formuna özel kriter ağırlıklandırması ve performans analizi yaparak, peyzaj planlamasında form-temelli karar destek sistemlerine örnek oluşturmıştır.

Bu yönüyle çalışma hem kentsel sürdürülebilirlik hem de iklim değişikliğiyle mücadele stratejileri çerçevesinde çevresel iyileştirme projelerine entegre edilebilecek bir model sunmaktadır.

6.2. En Uygun Türlerin Belirlenmesi

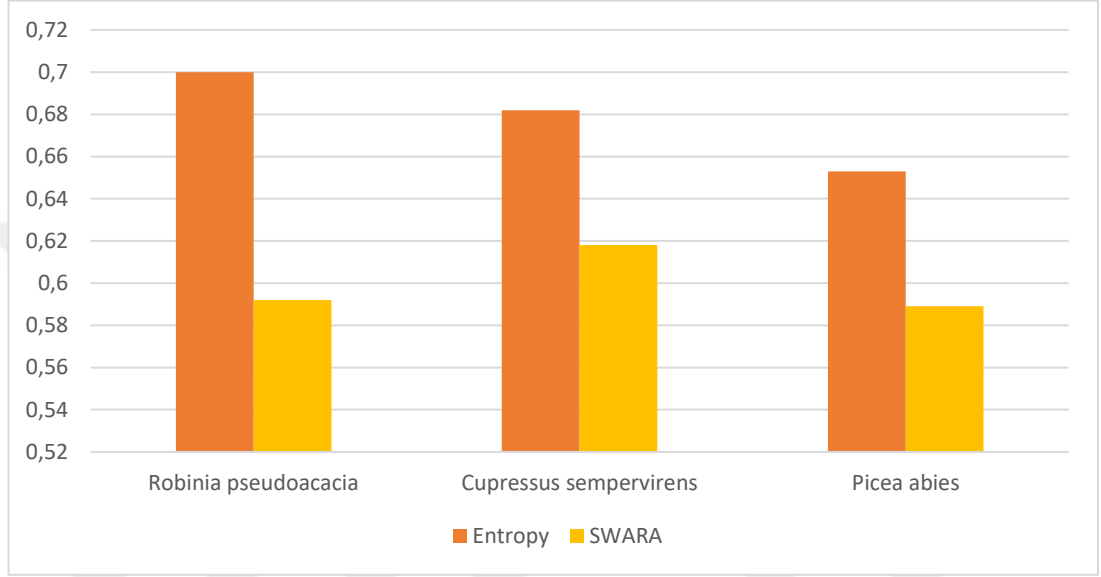
Yapılan analizler kapsamında, dört farklı bitki formuna (ağaç, çalı, yer örtücü ve sarılıcı) ait toplam 32 alternatif tür, belirlenen 12 kriter doğrultusunda çok kriterli karar verme yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıkları, SWARA ve Entropi yöntemlerinin entegre edildiği hibrit ağırlıklandırma modeli ile hesaplanmıştır. Bu yöntemsel yaklaşım sayesinde, hem uzman görüşüne dayalı öznel ağırlıklar hem de karar matrisine dayalı nesnel bilgiler sistematik biçimde bir araya getirilmiştir. Elde edilen ağırlıklarla oluşturulan karar matrisi, TOPSIS yöntemi ile analiz edilerek, her bitki türü için göreceli performans skorları hesaplanmıştır.

• Ağaçlar için sıralama

Tablo 6.2 Ağaçlar ilk üç sıralama

Sıra	Ağaç Türü	CC (Yakınlık)
1	<i>Robinia pseudoacacia</i> (Yalancı Akasya)	0,59
2	<i>Cupressus sempervirens</i> (Kara Selvi)	0,55
3	<i>Quercus robur</i> (Meşe)	0,53

Tablo 6.2’de görülmektedir ki ağaçlar grubunda, *Robinia pseudoacacia* ve *Cupressus sempervirens* hem karbon sekestrasyonu hem de rüzgâr ve gürültü kontrolü açısından en yüksek performansı göstermiştir. Bu türler, geniş taç yapısı ve uzun ömürlü formlarıyla otoyol kenarlarında önerilmektedir.



Şekil 6.1 Ağaçlar alternatiflerinin SWARA/Entropi ilk üç karşılaştırması (CC Yakınlık)

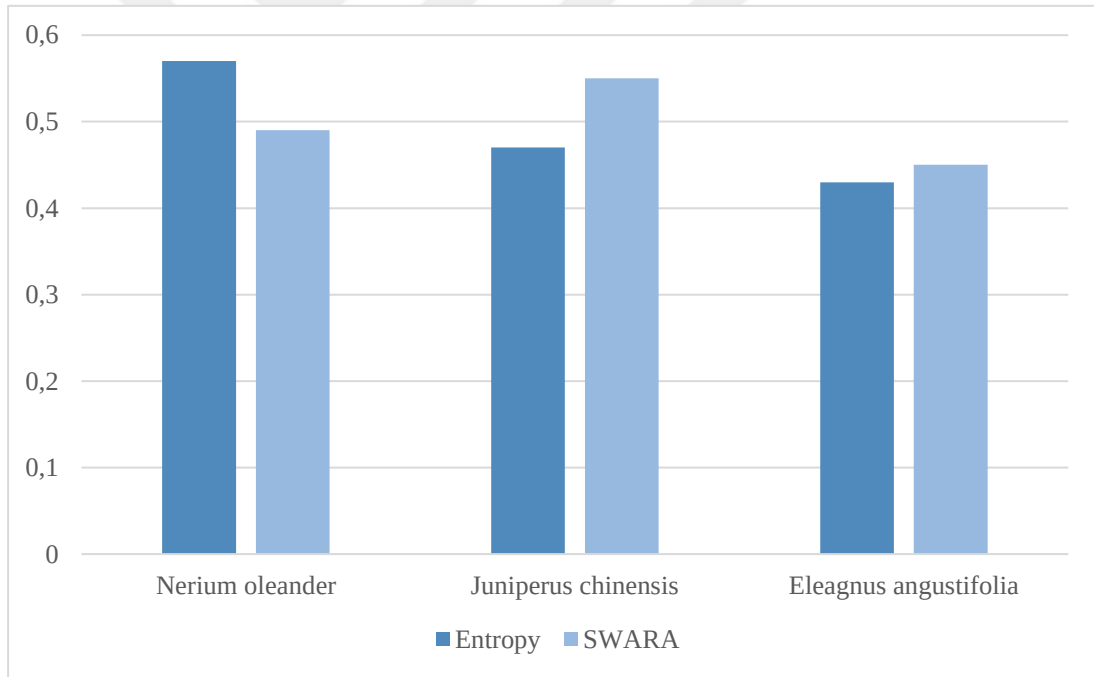
Şekil 6.1’de sunulan karşılaştırmalı grafik, ağaç formundaki üç alternatif türün (*Robinia Pseudoacacia*, *Cupressus Sempervirens*, *Picea Abies*) SWARA ve Entropi yöntemlerine göre elde edilen yakınlık (CC) skorlarını göstermektedir. Grafik verilerine göre, tüm türlerde Entropi tabanlı skorların SWARA skorlarına kıyasla daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Özellikle *Robinia Pseudoacacia*, her iki yöntemde de en yüksek performansı gösteren tür olarak öne çıkmakta; bu durum, söz konusu türün hem uzman görüşleri hem de kriter bazlı veri dağılımı açısından güçlü bir aday olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer türleri de benzer biçimde her iki yöntemle yapılan analizlerde üst sıralarda yer almakta ve sıralama bakımından yüksek düzeyde tutarlılık göstermektedir. Bu bulgu, SWARA ve Entropi yaklaşımların birlikte kullanıldığı hibrit sistemin, bitki türü seçiminde güvenilir ve dengeli bir değerlendirme sunduğunu ortaya koymaktadır.

- **Çalılar için sıralama**

Tablo 6.3 Çalılar ilk üç sıralama

Sıra	Çalı Türü	CC (Yakınlık)
1	Nerium oleander (Zakkum)	0,58
2	Juniperus chinensis (Ardıç)	0,48
3	Elaeagnus angustifolia (İğde çalı)	0,43

Tablo 6.3'te çalı formulu bitki türleri arasında yapılan değerlendirmede, *Nerium Oleander (Zakkum)* 0,58'lik CC skoru ile en yüksek performansa sahip tür olarak öne çıkmıştır. *Juniperus Chinensis (Ardıç)* 0,48 skorla ikinci sırada yer alırken, *Elaeagnus Angustifolia (İğde Çalı)* 0,43 skorla üçüncü sıradadır. Bu sıralama, türlerin çevresel, yapısal ve ekonomik kriterler açısından göreceli uygunluk düzeylerini yansıtmaktadır.



Şekil 6.2 Çalılar alternatiflerinin SWARA/Entropy ilk üç karşılaştırması (CC Yakınlık)

Şekil 6.2'de çalı formundaki üç alternatif türün (*Nerium Oleander*, *Juniperus Chinensis*, *Elaeagnus Angustifolia*) SWARA ve Entropi yöntemlerine göre elde edilen yakınlık (CC) skorları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Grafik verileri, her iki yöntemin sıralama açısından genel bir tutarlılık sağladığını ortaya koymaktadır. En yüksek skor, her iki yönteme göre de *Nerium Oleander* türüne ait olup, bu tür çalı formları arasında en uygun alternatif olarak öne çıkmaktadır. *Juniperus Chinensis (Ardıç)* türü, özellikle SWARA yönteminde daha yüksek performans göstermiş,

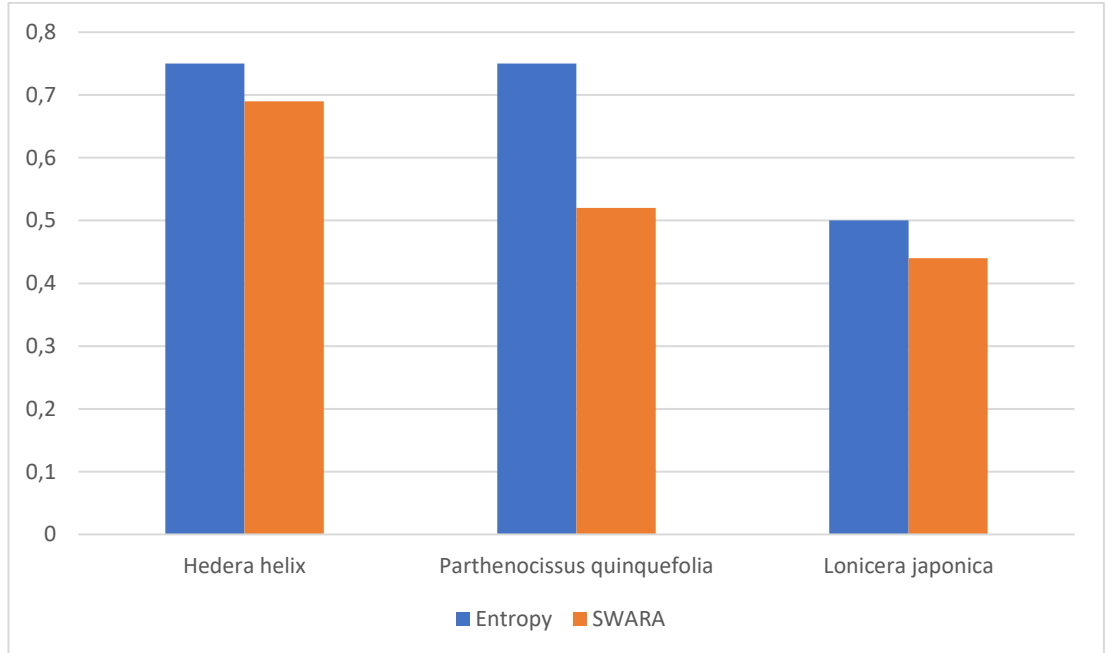
Entropi değeri ise orta düzeyde kalmıştır. Bu durum, ardıc türünün uzman değerlendirmelerinde daha avantajlı bulunduğunu göstermektedir. *Elaeagnus Angustifolia* (İğde Çalı) ise her iki yöntemde de en düşük skoru alarak çalı formları arasında en sınırlı performansı göstermiştir.

- **Yerörtücüler ve sarılıcalar için sıralama**

Tablo 6.4 Yerörtücüler ve sarılıcalar ilk üç sıralaması

Alternatif	CC	Sıra
Hedera helix (Orman sarmaşığı)	0,758	1
Parthenocissus quinquefolia (Amerikan sarmaşığı)	0,758	1
Lonicera japonica (Hanımeli)	0,507	2

Tablo 6.4'e göre yer örtücü ve sarılıcı bitkiler arasında *Hedera Helix* (Orman Sarmaşığı) ve *Parthenocissus Quinquefolia* (Amerikan Sarmaşığı) türleri, 0,758'lik eşit CC skoru ile en yüksek performansı sergilemiştir. Bu türler özellikle dikey yüzeylerde partikül tutumu ve yıl boyu yeşil kalma özellikleriyle öne çıkmaktadır. *Lonicera Japonica* (Hanımeli) ise 0,507'lik skorla ikinci sırada yer almıştır.



Şekil 6.3 Yerörtücüler ve sarılıcalar alternatiflerinin SWARA/Entropy ilk üç karşılaştırması (CC Yakınlık)

Şekil 6.3'te, yer örtücü ve sarılıcı bitki türlerinin SWARA ve Entropi yöntemleriyle elde edilen yakınlık (CC) skorları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafik verilerine göre *Hedera Helix* (Orman Sarmaşığı) ve *Parthenocissus Quinquefolia* (Amerikan Sarmaşığı) türleri, Entropi yöntemine göre oldukça yüksek ve birbirine eşit değerlere (yaklaşık 0,75) ulaşarak öne çıkmaktadır. Bu durum, her iki türün karar matrisinde yüksek bilgi içeriğine sahip olduğunu ve kriterler arasında güçlü bir ayırt edicilik sergilediğini göstermektedir. Öte yandan, SWARA yöntemine göre *Hedera Helix*'in skoru diğerlerine kıyasla daha yüksektir ve uzman değerlendirmeleri açısından da en uygun tür olarak öne çıkmaktadır. *Lonicera Japonica* (Hanımeli) ise her iki yöntem açısından da en düşük skoru almıştır. *Hedera Helix*'in her iki yöntem açısından da güçlü bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, dikey yüzey bitkilendirmelerinde hava kirleticilerin tutulması açısından etkili tercihler olduğunu desteklemektedir.

En yüksek TOPSIS skorlarına sahip türlerin karşılaştırmalı analizi, bu türlerin birden fazla kriterde dengeli başarı gösterdiğini ortaya koymuştur. Seçilen türlerin tamamı çalışma sahalarında kullanım açısından iklimine uygun, düşük bakım maliyetli ve estetik açıdan güçlü türler olarak sınıflandırılmıştır. Uygulama önerileri kapsamında, türlerin kullanılacağı fiziksel bağlamlar (otoyol kenarı, yaya kaldırımı, park çevresi, duvar alanları vb.) tanımlanmış, yerleşim önerileri haritalarla desteklenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, çalışmada geliştirilen hibrit ÇKKV yöntemi, yalnızca teorik bir analiz değil aynı zamanda uygulamaya dönük planlama önerileri geliştirme açısından da başarılı sonuçlar vermiştir.

6.3. Bitkilendirme Senaryoları

Bitkilendirme senaryolarının oluşturulduğu ve uygulamaların en verimli nasıl olabileceğini gösterdiğimiz örneklemeler üç farklı yöntem ile oluşturulmuştur. i-Tree Eco, ENVI-met ve AERMOD çıktılarıyla değerlendirilmiştir.

Tablo 6.5 Farklı sistemler ve uygulamalarla oluşturulan bitki senaryoları

Senaryo No	Uygulama Tipi	Türler	Kapsama (%)
S1	Yol kenarı çalı bandı	Nerium oleander, Juniperus chinensis	40
S2	Ağaç ve çalı kombinasyonu	Robinia pseudoacacia, Nerium oleander	70
S3	Yeşil duvar + dikey bahçe + yoğun ağaçlandırma	Cupressus sempervirens, Parthenocissus quinquefolia, Nerium oleander	100

Tablo 6.5'te, bitkilendirme uygulamalarının farklı kombinasyonlar ve sistemler üzerinden nasıl yapılandırılabileceğini gösteren üç farklı senaryo sunulmuştur. Bu senaryolar; uygulama tipi, kullanılan bitki türleri ve alanın bitki örtüsüyle kaplanma oranı (%) dikkate alınarak yapılandırılmıştır.

Senaryo 1, en basit uygulama olan yol kenarı çalı bandı modeline dayanmaktadır. Bu senaryoda *Nerium Oleander* ve *Juniperus Chinensis* gibi çalı formundaki türler tercih edilmiş olup, %40'lık bir kapsama oranı ile sınırlı bir etki alanı oluşturulmuştur. Bu model, düşük maliyetli ve uygulanabilir olması açısından avantajlıdır; ancak emisyon azaltım kapasitesi sınırlı kalabilir.

Senaryo 2, ağaç ve çalı kombinasyonunu esas alarak *Robinia Pseudoacacia* ve *Nerium Oleander* türlerini birlikte kullanmaktadır. Bu yapı hem düşey hem de yatay düzlemde bitki kütlesi oluşturarak %70 oranında bir kapsama sağlamış ve daha güçlü bir çevresel etki hedeflenmiştir. S2, görsel ve ekolojik işlevsellik açısından daha dengeli bir senaryodur.

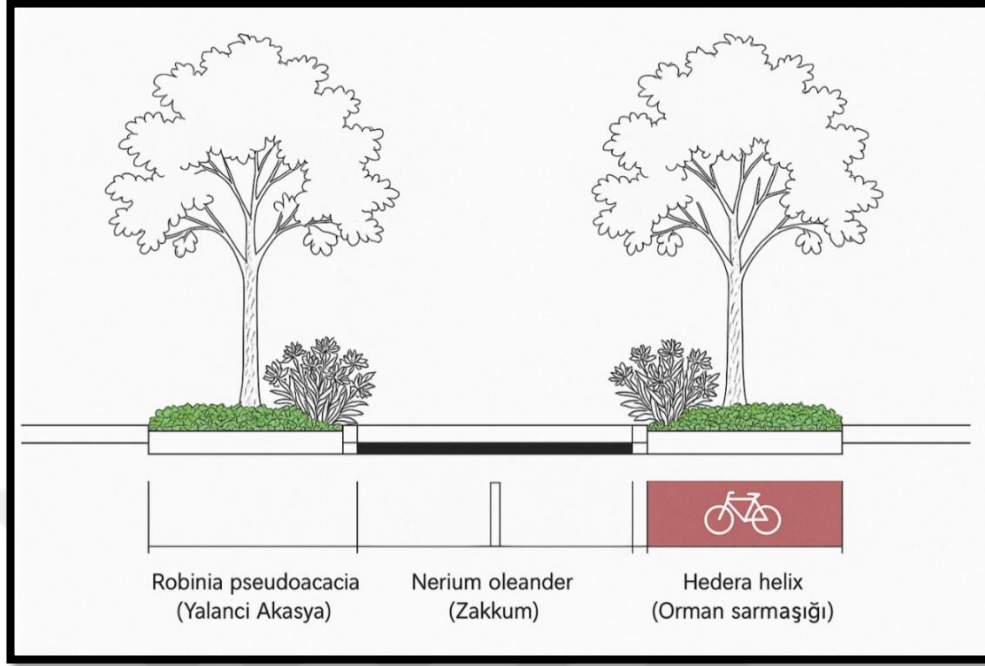
Senaryo 3 ise en kapsamlı modeldir. Yeşil duvar, dikey bahçe ve yoğun ağaçlandırma uygulamalarının entegre edildiği bu senaryoda *Parthenocissus Quinquefolia* ve *Nerium Oleander* gibi farklı bitki formları bir arada kullanılmıştır. %100 kapsama oranına ulaşan bu senaryo, hava kalitesi yönetiminde en yüksek performansı hedeflemekte ve çok katmanlı bitkilendirme yaklaşımıyla emisyon azaltımında maksimum etki sağlamaktadır.

Bu üçlü yapı, kent içi ulaşım koridorlarında alanın yapısal özelliklerine ve hedeflenen çevresel etkiye göre farklı bitkilendirme stratejilerinin nasıl kurgulanabileceğini göstermekte; aynı zamanda i-Tree Eco, ENVI-met ve AERMOD gibi model çıktılarıyla desteklenerek bilimsel temellere dayandırılmıştır.



Şekil 6.4 Bitkilendirme senaryoları uygulaması

Şekil 6.4, önerilen bitkilendirme senaryolarının kent içi ulaşım koridorlarında nasıl uygulanabileceğine dair gerçekçi bir görsel simülasyonu yansıtmaktadır. Uygulamada, yol kenarlarında ağaç, çalı ve yer örtücüsavaşlarçok katmanlı bir bitkilendirme düzeni oluşturulmuştur. Bitkilendirme tasarımı, araç yolları ile bisiklet yolu arasında bir yeşil tampon bölge işlevi görerek hem hava kirleticilerin yayılımını azaltmakta hem de mikroklimatik konfor oluşturmaktadır. Ayrıca, bu yapı hem ekosistem hizmetlerini güçlendirenonaaktif ulaşımı teşvik eden bir kentsel tasarım yaklaşımını temsil etmektedir.



Şekil 6.5 Bitkilerin uygulanmasına ait yol kesit görünümü

Şekil 6.5, önerilen bitkilendirme stratejisinin yol kesiti üzerinden nasıl uygulanabileceğini gösteren şematik bir görünümü sunmaktadır. Bu düzenlemede, *Robinia Pseudoacacia* (Yalancı Akasya), *Nerium Oleander* (Zakkum) ve *Hedera Helix* (Orman Sarmaşığı) türleri birlikte kullanılarak çok katmanlı bir bitkilendirme yapısı oluşturulmuştur. Kesiye göre; yol kenarındaki geniş dikim bantlarında, en arka planda ağaç formu olarak *Robinia pseudoacacia* yer almakta, onun önünde çalı formu olarak *Nerium oleander* ve en önde ise zemin düzeyinde yayılan yer örtücü/sarılcı form olarak *Hedera helix* konumlandırılmıştır. Bu düzenleme, düşeyde bitki yoğunluğunu artırarak hem estetik hem de çevresel performansı maksimize etmeyi hedeflemektedir. Özellikle bu bitki kombinasyonu, partikül madde (PM_{2.5}, PM₁₀) tutulumu, karbon sekestrasyonu, gürültü azaltımı ve mikroklimatik düzenleme açısından sinerjik katkılar sunmaktadır. Ayrıca, bitkilendirme şeması kent içi bisiklet yolu gibi aktif ulaşım hatlarıyla entegre edilerek çevreci ve sağlıklı ulaşım altyapılarına destek olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yönüyle, Şekil 6.5 hem çevresel hem de kamusal fayda açısından sürdürülebilir bir bitkilendirme modelinin fiziksel yansımasını göstermektedir.

Tablo 6.6 Oluşturulan senaryoların emisyon azaltım karşılaştırmaları

Senaryo	Yıllık PM _{2.5} Tutumu (kg/ha)	NO ₂ Tutumu (kg/ha)	CO ₂ Sekestrasyonu (ton/yıl)
S1	7,4	2,1	0,9
S2	12,6	4,5	2,3
S3	19,2	7,8	4,1

Tablo 6.6’da verilen sonuçlara göre, farklı bitkilendirme senaryolarının hava kirleticilerinin tutulumu ve karbon sekestrasyonu üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu görülmektedir. En düşük değerler mevcut durum senaryosunu temsil eden S1 modelinde gözlemlenmiş olup, bu senaryoda PM_{2.5} tutumu 7.4 kg/ha·yıl, NO₂ tutumu 2.1 kg/ha·yıl ve CO₂ sekestrasyonu 0.9 ton/yıl olarak hesaplanmıştır. Yeşil alan yoğunluğunun artırıldığı S2 senaryosunda bu değerler sırasıyla 12.6 kg/ha·yıl, 4.5 kg/ha·yıl ve 2.3 ton/yıl düzeyine ulaşmıştır. En yüksek performansın elde edildiği S3 senaryosunda ise PM_{2.5} tutumu 19.2 kg/ha·yıl, NO₂ tutumu 7.8 kg/ha·yıl ve CO₂ sekestrasyonu 4.1 ton/yıl olmuştur. Bu bulgular, bitkilendirme yoğunluğu ve tür çeşitliliği arttıkça hava kirleticilerinin filtrasyon kapasitesinin ve karbon yutak potansiyelinin yükseldiğini ortaya koymaktadır. Özellikle S1’e kıyasla S3 senaryosunda PM_{2.5} tutumunda yaklaşık %159, NO₂ tutumunda %271, CO₂ sekestrasyonunda ise %355 oranında artış gözlenmiştir. Bu durum, yaprak yüzey alanının artması, geniş yapraklı ve iğne yapraklı türlerin birlikte kullanılması ile stomal absorpsiyonun güçlenmesinden kaynaklanmaktadır [19]-[20], [75].

Kentsel yeşil altyapı planlamasında bitki yoğunluğu ve tür kompozisyonunun optimize edilmesi, hava kalitesi iyileştirmesi ve iklim değişikliğine uyum stratejileri açısından kritik öneme sahiptir. Elde edilen sonuçlar, özellikle i-Tree Eco modeli ile yapılan değerlendirmelerin, Tier 1 temelli emisyon azaltım hesaplamalarıyla uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda S3 senaryosu hem partikül madde hem de gaz fazı kirleticilerin tutulumu açısından en etkin çözüm olarak öne çıkmaktadır.

6.4. Analitik Bulgular ve Katkılar

Bu araştırma, kent içi ulaşım kaynaklı emisyonların azaltılmasında bitki türü seçiminin stratejik önemini ÇKKV yöntemleri çerçevesinde ortaya koyarak, yeşil altyapı planlamasında tür-form ilişkisine dayalı sistematik bir değerlendirme modeli geliştirmiştir. Çalışma kapsamında önerilen hibrit ÇKKV modeli, yalnızca teorik bir analiz aracı olmakla kalmayıp, aynı zamanda kent planlaması, peyzaj tasarımı ve

çevresel politika üretimi süreçlerinde uygulanabilir bir karar destek mekanizması olarak geliştirilmiştir.

Elde edilen bulgular, özellikle yol kenarı bitkilendirme uygulamalarının, başta ağaç ve çalı formları olmak üzere emisyon azaltımında etkili bir araç olduğunu göstermektedir. Geniş yaprak yüzeyi, yüksek taç yoğunluğu ve uzun ömürlü yapılarıyla öne çıkan *Robinia Pseudoacacia* içinde *Cupressus Sempervirens* gibi türler, özellikle karbon sekestrasyonu (CO₂) ve partikül madde (PM_{2.5}, PM₁₀) tutma kapasiteleri bakımından en yüksek performans skorlarını elde etmiştir. Bu türlerin ulaşım koridorlarında kullanımı hem doğrudan hava kalitesi iyileştirmesi hem de dolaylı mikroklimatik katkılar açısından önem arz etmektedir.

Çalı ve sarılıcı formlar, çoğunlukla ikincil fayda alanı olarak görülen gürültü azaltımı, rüzgâr kırıcı etki ve estetik peyzaj katkısı gibi kriterlerde yüksek performans göstererek, çok kriterli değerlendirme sisteminde öne çıkmıştır. Bu durum, Türkiye’de yeşil altyapı planlamasında hâlen ağaç odaklı yürütülen tür seçim süreçlerinde, ağaç dışı bitki formlarının da sistematik olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Özellikle yer örtücü türler, düşük bakım maliyetleri, hızlı yayılma özellikleri ve eğimli yüzeylerde erozyon kontrolü ve toprak stabilizasyonuna katkıları ile, refüj, yol kenarı setleri ve kaldırım altı gibi dar ve zorlayıcı alanlarda etkili uygulama alternatifleri sunmaktadır. Bu türlerin kentsel alanda daha yaygın kullanımı, yeşil altyapı sistemlerinin hem bakım yükünü azaltmakta hem de yüzey bütünlüğünü desteklemektedir.

Her bitki formu için kriter ağırlıklarının ayrı ayrı belirlenmiş olması, forma özgü çalışmasına olanak tanımış ve böylece model, sadece tür bazlı değil, form temelli bir karar destek aracı olarak işlev kazanmıştır. Bu yaklaşım, Türkiye’de genellikle göz ardı edilen ancak bitkilendirme kararlarında mekânsal uygunluk ve uygulama kolaylığı açısından kritik önem taşıyan bir boşluğa işaret etmektedir.

TOPSIS yöntemiyle yapılan nihai analizde, dört bitki formu (ağaç, çalı, sarılıcı, yer örtücü) için en uygun türler ayrı ayrı sıralanmış ve bu türlerin iklimsel tolerans, emisyon azaltım kapasitesi ve sürdürülebilirlik göstergeleri açısından çalışma alanına uygunluk düzeyleri belirlenmiştir. Ayrıca, İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa gibi Türkiye’nin dört büyük kentinde mevcut yeşil altyapı örnekleri incelenmiş; önerilen

türlerin bu kentlerdeki uygulama eğilimleriyle büyük oranda örtüştüğü saptanmıştır. Bu durum, modelin yalnızca teorik değil, pratik ve uygulanabilir yönleriyle de kent ölçeğinde karşılık bulabileceğini göstermektedir.

Çalışma, literatürde ilk kez kentsel ulaşım – emisyon – bitkilendirme ilişkisini ÇKKV yöntemleriyle kapsamlı bir şekilde ele alan örneklerden biri olmuştur. Yalnızca ağaç türlerine değil; çalı, yer örtücü ve sarılıcı türlere de sistematik biçimde yer verilmesi, modelin kapsayıcı ve bütüncül niteliğini güçlendirmiştir. Her bitki formuna ilişkin geliştirilen ölçülebilir performans skorları, karar tabloları, görselleştirmeler ve yerleşim önerileri, planlamacılar, peyzaj mimarları ve yerel yönetim temsilcileri için somut karar destek çıktıları sunmaktadır.

6.5. Tartışma

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, kentsel ulaşım koridorlarındaki emisyon yükünün azaltılmasında doğa tabanlı çözümlerin (NBS) sadece estetik bir unsur değil, teknik bir zorunluluk olduğunu ortaya koymaktadır [23].

-Metodolojik Yaklaşımın Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Literatürde bitki türü seçimi çalışmalarında genellikle AHP veya TOPSIS gibi ÇKKV yöntemleri kullanılmaktadır [129]. Ancak bu tez çalışmasında uygulanan SWARA, DEMATEL ve Entropy hibrit modeli hem uzman görüşlerini hem de veriye dayalı nesnel varyasyonları birleştirerek daha güçlü bir karar destek mekanizması oluşturmuştur.

DEMATEL analizi sonucunda, İklimsel Dayanıklılık (K7) ve Toprak Toleransı (K9) kriterlerinin sistemi yönlendiren "neden" faktörleri olduğu saptanmıştır. Bu bulgu, bitkilerin emisyon sönümleme performansından önce kentsel ulaşım akslarının zorlu mikroklimatik koşullarında (ısı adası, egzoz gazı baskısı) hayatta kalabilme becerisinin öncelikli olduğunu kanıtlamaktadır. Emisyon Azaltım Kapasitesi'nin (K1) "sonuç" grubunda yer alması, çevresel faydanın ancak ekolojik uyum sağlandığında sürdürülebilir bir çıktı olarak ortaya çıkacağını göstermektedir.

Çalışma sonucunda ağaçlar grubunda ilk sırayı alan *Robinia Pseudoacacia* (Yalancı Akasya) (CC=0,59), yüksek karbon sekestrasyonu ve PM tutma kapasitesi ile öne çıkmıştır. Bu sonuç, Nowak ve ark. tarafından yapılan ve kentsel ağaçların hava kalitesi ile insan sağlığı üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalarla tam bir uyum

içerisindedir [4],[6]. *Robinia Pseudoacacia* (Yalancı Akasya'nın pürüzlü ve tüylü yaprak morfolojisinin partikül madde yakalamadaki etkinliği, Park ve ark. tarafından vurgulanan "yaprak yüzey pürüzlülüğü ve PM tutma ilişkisi" teorisini desteklemektedir [45].

Çalı kategorisinde birinci sırada yer alan *Nerium Oleander* (Zakkum) (CC=0,58), literatürde belirtildiği üzere egzoz emisyonlarına karşı yüksek toleransı ve düşük bakım gereksinimi ile refüj bitkilendirmesi için en ideal türlerden biri olduğunu kanıtlamıştır. Sarılıcalar grubunda en yüksek skoru (CC=0,758) alan *Hedera Helix* (Orman Sarmaşığı) ve *Parthenocissus Quinquefolia* (Amerikan Sarmaşığı), dikey yüzeylerdeki PM tutma ve yıl boyu yeşil kalma özellikleriyle öne çıkmıştır. Bu durum, Barwise ve Kumar tarafından sunulan yeşil bariyerlerin hava kirliliğini azaltma potansiyeline dair bulgularla örtüşmektedir [23].

-Emisyon Senaryoları ve İyileştirme

Çalışmada kurgulanan üç farklı senaryonun karşılaştırmalı analizi, yeşil altyapı yoğunluğunun emisyon sönümlleme üzerindeki etkisini nicel olarak kanıtlamıştır.

- S3 Senaryosu (Çok Katmanlı Bitkilendirme): Yoğun ağaçlandırma, çalı bantları ve yeşil duvarların entegre edildiği bu model; PM_{2.5} tutumunda 19.2 kg/ha·yıl, NO₂ tutumunda 7.8 kg/ha·yıl ve CO₂ sekestrasyonunda 4.1 ton/yıl değerine ulaşmıştır.

- S1 senaryosu ile kıyaslandığında, S3 modelinin CO₂ sekestrasyonunda %355, NO₂ tutumunda ise %271 oranında daha fazla iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

Bu bulgu, Aini ve Shen (2020) ile Abhijith ve ark. (2017) tarafından tartışılan, farklı bitki yerleşim desenlerinin ve yoğunluğunun kirletici dispersiyonu üzerindeki belirleyici etkisi ile paraleldir [25], [58]. Özellikle otoyol kenarlarında "çok katmanlı" bir yapının kurulması, egzoz seviyesindeki kirleticilerin yaya bölgesine ulaşmadan filtrelenmesini sağlamaktadır.

-Kentsel Hava Kalitesi ve Eşik Değerlerin Analizi

D-100 Göztepe Kavşağı özelinde yapılan ölçümler, PM_{2.5} ve NO₂ seviyelerinin WHO (2021) ve AB (2008) eşik değerlerinin oldukça üzerinde seyrettiğini göstermektedir. 2023 verilerine göre Göztepe istasyonunda ölçülen PM₁₀ değerleri, WHO'nun yıllık kılavuz değerinin yaklaşık 2,6 kat üzerindedir. Bu durum, Seinfeld ve Pandis (2016) ile Kumar ve ark. (2023) tarafından vurgulanan "trafik kaynaklı hava kirliliği ve insan sağlığı riski" arasındaki kritik ilişkiyi doğrulamaktadır [3],[17].

Önerilen bitkilendirme modeli, İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa verileri üzerinden yapılan projeksiyonlarla bölgesel ölçekte de geçerliliğini kanıtlamıştır. Örneğin; Bursa gibi sanayi ağırlıklı illerde OSB çevresinde oluşturulacak yeşil tampon bölgelerin, sanayi-konut geçiş zonlarında birincil filtreleme aracı olabileceği saptanmıştır.

Araştırma bulguları, kentsel yeşil altyapı planlamasında bitki seçiminin sadece bir peyzaj tercihi değil, veri destekli bir çevre mühendisliği kararı olduğunu göstermektedir. Literatürdeki çalışmalar bitkilerin genel filtreleme gücüne odaklansa da, bu tez çalışması hibrit ÇKKV ve i-Tree Eco modelleme entegrasyonu ile Türkiye'nin büyükşehir ulaşım koridorları için özgün ve ölçeklenebilir bir metodoloji sunarak literatüre katkı sağlamıştır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde hızla artan ve çoğu zaman plansız gerçekleşen kentleşme süreci, beraberinde ulaşımdan kaynaklı çevresel baskıları da getirmektedir. Özellikle fosil yakıt temelli motorlu taşıt sistemlerinin yoğun biçimde kullanıldığı büyükşehirlerde, ulaşım koridorları ciddi hava kirletici kaynağı haline gelmiştir. PM_{2.5}, PM₁₀, NO_x, CO ve CO₂ gibi kirleticilerin kentsel atmosferdeki birikimi, yalnızca hava kalitesini düşürmekle kalmamakta; aynı zamanda halk sağlığı üzerinde doğrudan tehdit oluşturmaktadır. Bu bağlamda, ulaşım sistemlerinden kaynaklanan emisyonların kontrol altına alınması, sadece teknolojik çözümlerle değil, aynı zamanda doğa tabanlı bütüncül stratejilerle de ele alınmalıdır.

Bu çalışmada, İstanbul'un önemli ulaşım arterlerinden biri olan D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı örneği üzerinden yürütülmüş ve kentsel ulaşım koridorlarında doğaya dayalı çözümler (Nature-Based Solutions- NBS) çerçevesinde yerel bitki dokusunu temel alan yenilikçi bir karar destek modeli geliştirilmiştir. Çalışmada temel amaç, ulaşım kaynaklı emisyonların azaltımında kullanılabilecek bitki türlerini bilimsel kriterlerle değerlendirmek, bu türlerin çevresel, yapısal ve ekonomik boyutlarını çok kriterli analiz yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak incelemek ve en uygun bitki kombinasyonlarını belirlemektir.

Araştırmada kullanılan i-Tree Eco tabanlı biyofiziksel veriler ve IPCC Tier 1 metodolojisi ile yapılan emisyon envanter hesaplamaları, söz konusu emisyonların mekânsal dağılımı ve büyüklüğü hakkında nicel bilgiler sunmuştur. Bu veriler üzerine inşa edilen SWARA, DEMATEL ve Entropi yöntemlerini içeren bütünlük ağırlıklandırma yaklaşımı, bitki seçimi sürecinde kriterlerin önem düzeylerini nesnel ve uzman görüşlerine dayalı olarak belirlemiştir.

TOPSIS yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen alternatif analizinde; 32 farklı bitki taksonu, 12 kriter kapsamında değerlendirilmiştir. Bu kriterler arasında "emisyon azaltım kapasitesi", "iklimsel dayanıklılık", "bakım maliyeti", "trafik güvenliği", "estetik katkı", "kuraklık toleransı" gibi çok boyutlu göstergeler yer almıştır. Elde edilen bulgulara göre emisyon azaltım kapasitesi, karar matrisinde en baskın kriter

olarak ön plana çıkmış; bunu sırasıyla "iklimsel dayanıklılık" ve "trafik güvenliği etkisi" izlemiştir.

TOPSIS analizine göre en yüksek performans gösteren türler şu şekilde belirlenmiştir:

- Ağaç Formu: *Robinia pseudoacacia* (Yalancı Akasya), geniş yüzey alanı ve yüksek emisyon tutma kapasitesi ile en üst sırada yer almıştır. Ardından *Cupressus sempervirens* (Kara Selvi), yıl boyu yaprak dökmemesi ve dayanıklılığı ve *Quercus robur* (Meşe) ise ekolojik çeşitlilik ve yerli tür olması ile önemli olmuştur.
- Çalı Formu: *Nerium oleander* (Zakkum), estetik değeri, kuraklık toleransı ve ağır metallere karşı dayanıklılığı ile ulaştırma koridorları için en uygun çalı türü olarak belirlenmiştir.
- Yer Örtücüler ve Sarılıcılar: *Hedera helix* (Orman sarmaşığı) ve *Parthenocissus quinquefolia*, özellikle dikey yüzeylerde partikül madde (PM) tutma kapasitesi ve yıl boyu yeşil kalma özellikleri ile yüksek performans göstermiştir. TOPSIS analizi sonucunda bu iki tür $C_a = 0.758$ performans indeksi ile en yüksek değeri almıştır.

Bu çalışmada ele alınan senaryo temelli simülasyon modelleri, farklı yeşil altyapı kompozisyonlarının emisyon üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymuştur. S1 senaryosu, sadece ağaç kullanımı içeren temel bir peyzaj yaklaşımını temsil ederken; S3 senaryosu, ağaç + çalı + yer örtücü formasyonundan oluşan çok katmanlı bitkilendirme stratejisini içermektedir. Analiz sonuçları, S3 senaryosunun CO₂ sekestrasyonunda %355, NO₂ tutulumunda ise %271 oranında iyileşme sağladığını göstermiştir. Bu sonuç, tek tip yeşil altyapı uygulamalarının sınırlı etkisini ortaya koyarken; çok katmanlı, form çeşitliliği içeren bitkilendirme yaklaşımlarının sinerjik bir etki ürettiğini açıkça göstermektedir.

Modelin ulusal ölçekte uygulanabilirliği, İstanbul dışında Ankara, İzmir ve Bursa gibi büyükşehirlerin meteorolojik ve morfolojik verileri üzerinden yapılan karşılaştırmalı analizlerle test edilmiştir. Her kentin farklı mikroklimatik yapıları göz önüne alınarak tür seçimlerinin lokalize edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu

doğrultuda, Türkiye'nin farklı biyoklimatik bölgeleri için özgün tür listeleri ve bitkilendirme stratejileri geliştirilmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

- **Planlama ve Politika Önerileri**

Araştırma bulguları, ulaşımdan kaynaklanan hava kirliliği ile mücadelede teknolojik araçların yeterli olmadığını; yerel bitki dokusunu esas alan, doğa tabanlı yeşil altyapı çözümlerinin sistematik olarak planlama süreçlerine entegre edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda hem kentsel planlama hem de çevresel politika boyutuna yönelik öneriler:

-Yasal Mevzuat ve Standardizasyon: Ulaşım koridorlarında uygulanan peyzaj düzenlemeleri, günümüzde büyük ölçüde estetik tercihlere dayalı olarak yürütülmektedir. Bu yaklaşımın işlevsel olmaktan uzak olduğu ve hava kalitesi açısından etkinlik üretmediği tespit edilmiştir. Bu nedenle, “Fonksiyonel Yeşil Altyapı Kriter Listeleri” hazırlanarak, bitki türlerinin seçimi emisyon azaltma potansiyeli, bakım gereksinimi, dayanıklılık ve karbon sekestrasyonu gibi bilimsel temellere dayandırılmalıdır. Bu listeler, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı koordinasyonunda yasal düzenlemelerle zorunlu hale getirilmelidir.

-Mekânsal Entegrasyon ve Yeşil Tampon Bölgeler: Ulaşım Ana Planları ve Nazım İmar Planlarında, özellikle yüksek yoğunluklu trafik arterlerinde “Yeşil Tampon Bölgeler” yasal zorunluluk olarak planlamaya dâhil edilmelidir. Bu alanlar, hem hava kalitesi iyileştirme hem de görsel ve psikolojik konfor unsuru olarak işlev görmektedir. Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği’ne, bu tezde başarıyla test edilen “çok katmanlı bitkilendirme tipolojisi” (ağaç + çalı + yer örtücü) entegre edilmelidir.

-Bölgesel Bitki Performans Envanterleri: Türkiye’nin farklı biyo-iklimsel kuşakları için bitki türü performans envanterleri oluşturulmalıdır. Bu envanterler, su tüketimi, karbon tutma kapasitesi, kuraklık toleransı ve bakım gereksinimi gibi kriterlere göre türleri sınıflandırılmalıdır. Egzotik türlerin kullanımı sınırlandırılmalı; yerli ve dayanıklı taksonlar teşvik edilmelidir.

-CBS Tabanlı Dijital Karar Destek Sistemleri: Büyükşehir belediyeleri ve Karayolları Genel Müdürlüğü, bitki türü seçim süreçlerini dijital tabanlı karar destek

yazılımları aracılığıyla yönetmelidir. Bu tezde geliştirilen model, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile entegre edilerek farklı senaryolar altında otomatik tür önerisi sağlayacak yapıya dönüştürülebilir.

-Dikey ve Yapısal Yeşil Sistemlerin Standartlaştırılması: Viyadükler, tünel ağızları, köprü kenarları gibi yapı alanlarında “Yeşil Duvar” sistemleri yasal çerçeveye kavuşturulmalıdır. Özellikle *Hedera helix* gibi yıl boyu yeşil kalan sarılıcı türler, bu alanlarda PM tutulumunu artırmakta ve görsel kaliteyi desteklemektedir. Bu sistemler standart peyzaj elemanları olarak planlama belgelerinde yer almalıdır.

Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

-Bu çalışmada geliştirilen model, teorik düzeyde güçlü bir veri temeline ve karar analitiği altyapısına dayanmaktadır. Ancak modelin saha koşullarında geçerliliğinin test edilmesi, pilot (örneğin orta refüjler, yol kenarı setleri, viyadük altları, trafik adaları gibi kentsel ulaşım koridorları boyunca) dikilmesi ve bu alanlarda modelin öngördüğü çevresel faydaların gerçekleşip gerçekleşmediğinin izlenmesi gerekmektedir.

Bu izleme süreci, PM_{2.5}, PM₁₀, NO_x, CO ve CO₂ gibi temel hava kirleticilerin konsantrasyonlarının düzenli olarak ölçülmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, Nesnelerin İnterneti (IoT) (İnternet) teknolojisine dayalı gerçek zamanlı sensör sistemlerinin kullanılması önerilmektedir. Bu sensörler hem düşük maliyetli hem de yüksek frekanslı veri sağlayabilmeleri açısından saha koşullarında etkili bir izleme imkânı sunar. Ayrıca, bu sistemler sayesinde meteorolojik değişkenler (sıcaklık, nem, rüzgâr hızı) ile emisyon düzeyleri arasındaki ilişkiler de analiz edilebilir.

Toplanan saha verileri, model tarafından üretilen tahminsel değerlerle karşılaştırılarak modelin ampirik geçerliliği test edilebilir. Elde edilecek doğruluk oranları, modelin diğer ulaşım koridorlarında da yaygınlaştırılabilirliğine dair kararlar alınmasını kolaylaştıracaktır. Aynı zamanda, farklı türlerin zaman içinde gösterdiği performans değişimi de izlenerek, tür bazlı etkilerin mevsimsel varyasyonları değerlendirilebilir. Bu tür uygulama temelli doğrulama süreçleri, teorik modellerin pratik kent planlaması ve çevresel yönetim araçlarına dönüştürülmesinde önemli bir köprü işlevi görmektedir. Ayrıca, yerel yönetimlerin yatırım kararlarını bilimsel veriye dayalı biçimde yönlendirebilmesi açısından da değerli bir kanıt tabanı oluşturacaktır.

-Bitkilerin yıllık gelişim döngüsü (fenoloji), özellikle yaprak dökme ve tomurcuklanma gibi dönemsel değişimler, hava kirliliği tutma kapasitesi üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle, ileriki çalışmalarda fenolojik dinamiklerin detaylı biçimde modellenmesi önem arz etmektedir. Zaman serisi analizleri ve uzaktan algılama verileri (örneğin NDVI) yardımıyla yaprak alan indeksi değişimleri takip edilebilir. Özellikle kış aylarında yaprak döken türlerin pasif kalmasının yarattığı emisyon artışı, her dem yeşil iğne yapraklı türlerle nasıl dengelenebilir sorusuna yanıt aramak, karma tür dikim senaryolarının optimizasyonu açısından önemlidir.

-Yeşil altyapı uygulamaları genellikle tek boyutlu kazanımlar (örneğin yalnızca karbon sekestrasyonu) üzerinden değerlendirilse de, bu yaklaşım karar verme süreçlerinde yetersiz kalmaktadır. Gelecek araştırmalar, emisyon azaltımı, su yönetimi, ısı adası etkisinin azaltılması, biyolojik çeşitliliğe katkı, sosyal faydalar ve ekonomik maliyetler gibi çok sayıda etkiyi aynı sistemde değerlendiren çok kriterli fayda-maliyet analizlerine odaklanmalıdır. Bu yaklaşım, yatırım planlarının sürdürülebilirlik temelli ve sistemik bir çerçevede yapılmasına katkı sağlayacaktır. Özellikle doğa tabanlı çözümlerin kamu yatırımları içindeki yerini sağlamlaştırmak için bu analizlerin stratejik planlama belgelerine entegre edilmesi gerekmektedir.

-Bitkilendirme uygulamaları, yalnızca fiziksel çevre üzerinde değil, bireylerin algıları ve psikolojik durumları üzerinde de etkiler üretmektedir. Bu nedenle, ileriki çalışmalarda yeşil altyapının kent sakinleri üzerindeki psikolojik ve sosyal etkileri detaylı biçimde araştırılmalıdır. Termal konfor algısı, gürültü azaltımı hissi, estetik memnuniyet, stres düzeyinin düşürülmesi ve kamusal alanlara aidiyet gibi faktörler anket, odak grup görüşmeleri ve yapılandırılmış gözlem yöntemleri ile ölçülebilir. Ayrıca, farklı sosyo-ekonomik düzeylere sahip mahallelerde gerçekleştirilecek karşılaştırmalı çalışmalar, çevresel adalet ve eşitlikçi planlama ilkeleri açısından önemli katkılar sağlayacaktır. Böylece bitkilendirme politikalarının sadece çevresel değil, aynı zamanda sosyal sürdürülebilirliğe de katkı sunması mümkün olacaktır.

-CBS ve Yapay Zekâ Destekli Karar Destek Sistemlerinin Geliştirilmesi: Bu tezde geliştirilen karar destek modeli, ağırlıklı olarak istatistiksel ve analitik yöntemler üzerine kuruludur. Ancak artan veri hacmi ve çeşitliliği göz önünde bulundurulduğunda, gelecekte bu tür modellerin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve yapay zekâ (YZ) tabanlı yazılım sistemleriyle bütünleştirilmesi büyük önem

taşımaktadır. Bu kapsamda, özellikle belediyeler ve ulaştırma otoriteleri için kullanıcı dostu, web tabanlı veya masaüstü yazılımlar geliştirilerek, bitki seçimi, alan uygunluğu analizi ve emisyon azaltım potansiyeli gibi faktörlerin entegrasyonu mümkün hale getirilebilir. Makine öğrenmesi, geçmiş uygulamalardan elde edilen verileri analiz ederek gelecekteki en uygun tür ve stratejileri öneren otomatik sistemler geliştirilmesine olanak sağlayabilir.

-Bölgesel ve Ulusal Ölçekli Bitki Performans Veri Tabanları Oluşturulması: Türkiye'nin farklı biyo-iklimsel bölgeleri arasında (Marmara, Ege, İç Anadolu, Karadeniz vb.) gerek iklimsel gerekse toprak özellikleri bakımından önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bu nedenle, gelecekte bitki performans veri tabanlarının bölgesel ölçekte oluşturulması, tür seçimi sürecinde büyük kolaylık sağlayacaktır. Bu veri tabanları, karbon tutma kapasitesi, PM_{2.5}/PM₁₀ filtrasyonu, su ihtiyacı, bakım sıklığı, iklim dayanıklılığı, hastalıklara direnç gibi yerel ve egzotik tür kullanımının sınırlandırılması için bu veri tabanları planlama ve mevzuat süreçlerine entegre edilmelidir.

-Kentsel Senaryolar ve İklim Değişikliği Bağlamında Uygulamalar: İklim değişikliği, şehirlerdeki hava kalitesi ve ekosistemlerin işleyişi üzerinde doğrudan etkiler üretmektedir. Bu nedenle, önerilen modelin iklim değişikliği senaryoları altında nasıl performans göstereceği, iklim projeksiyonları, yerel iklim verileriyle entegre edilerek, farklı gelecek senaryolarına göre yeşil altyapı planlaması yapılabilir.

-Disiplinler arası Yaklaşımların Güçlendirilmesi: Bu tez çalışması çevre mühendisliği, peyzaj mimarlığı ve şehir bölge planlama disiplinleri arasında bir köprü kurmayı hedeflemiştir. Ancak gelecekte, özellikle ekoloji, çevre psikolojisi, ekonomi, sosyoloji ve bilgisayar mühendisliği gibi alanlarla iş birliği içinde yürütülecek çalışmalar, çok daha kapsamlı sonuçlar üretebilir. Böylece doğa tabanlı çözümler sadece çevreyle sınırlı kalmaz; aynı zamanda sosyal, ekonomik ve yönetişimsel boyutları da içeren çok katmanlı sistemler hâline gelir.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında geliştirilen model, Türkiye'nin kentlerinde uygulanabilir, bilimsel temellere dayalı ve karar vericiler tarafından adapte edilebilir bir çerçeve sunmaktadır. Ancak hava kirliliği ile mücadele, yalnızca teknik çözümlerle değil, veri tabanlı, katılımcı ve disiplinler arası yaklaşımlarla desteklendiğinde kalıcı ve sürdürülebilir hale gelebilecektir. Yukarıda önerilen araştırma başlıkları hem

mevcut modelin derinleştirilmesine hem de ulusal ölçekte yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacak potansiyele sahiptir. Bu çerçevede yapılacak ileri çalışmalar, Türkiye'nin "net sıfır emisyon ve yeşil şehir" hedeflerine ulaşmasında bilimsel yol gösterici olacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] IPCC, "(2006) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Refinement," 2006. Erişim: 12 Haziran 2024. Erişim adresi: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- [2] EEA, "Greenhouse gas emissions by source sector," Eur. Environ. Agency, 2022. Erişim: 15 Haziran 2024. Erişim adresi: <https://www.eea.europa.eu>
- [3] J. H. Seinfeld and S. N. Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2016.
- [4] D. J. Nowak, S. Hirabayashi, A. Bodine, and E. Greenfield, "Tree and forest effects on air quality and human health in the United States," *Environ. Pollut.*, vol. 193, pp. 119–129, 2014. doi: 10.1016/j.envpol.2014.05.028
- [5] UN-Habitat, "World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization," 2020. Erişim: 15 Haziran 2024. Erişim adresi: <https://unhabitat.org>
- [6] D. J. Nowak, E. J. Greenfield, R. E. Hoehn, and E. LaPoint, "Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States," *Environ. Pollut.*, vol. 178, pp. 229–236, 2013. doi: 10.1016/j.envpol.2013.03.019
- [7] US EPA, "MOVES3: Motor Vehicle Emission Simulator," U.S. Environ. Prot. Agency, 2020. Erişim: 21 Haziran 2024. Erişim adresi: <https://www.epa.gov/moves>
- [8] WHO, "Global Air Quality Guidelines," World Health Organ., 2021. Erişim: 21 Haziran 2024. Erişim adresi: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [9] Transport & Environment, "Real-world emissions from diesel cars," 2021. Erişim: 30 Haziran 2024. Erişim adresi: <https://www.transportenvironment.org>
- [10] F. Karagulian, C. A. Belis, C. F. C. Dora, A. M. Prüss-Ustün, S. Bonjour, H. Adair-Rohani, and M. Amann, "Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level," *Atmos. Environ.*, vol. 120, pp. 475–483, 2015. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.08.087

- [11] R. Popek, H. Gawrońska, M. Wrochna, S. W. Gawroński, and A. Sæbø, "Particulate matter on foliage of 13 woody species: Deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes—a 3-year study," *Int. J. Phytoremediat.*, vol. 15, no. 3, pp. 245–256, 2013. doi: 10.1080/15226514.2012.694498
- [12] EEA, CO2 emission performance of new passenger cars in Europe," Eur. Environ. Agency, 2022. Erişim: 05 Temmuz 2024. Erişim adresi: <https://www.eea.europa.eu>
- [13] UITP, "Public Transport: The Smartest Way to Travel," Int. Assoc. Public Transp., 2022. Erişim: 06 Temmuz 2024. Erişim adresi: <https://uitp.org>
- [14] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Türkiye Elektrik Enerjisi Üretim İstatistikleri," 2023. Erişim: 06 Temmuz 2024. Erişim adresi: <https://enerji.gov.tr>
- [15] IEA, "Global EV Outlook 2023: Catching Up with Climate Ambitions," Int. Energy Agency, 2023. Erişim: 10 Temmuz 2024. Erişim adresi: <https://www.iea.org>
- [16] Y. Wang, J. Wu, K. Chen, and P. Liu, "Are shared electric scooters energy efficient? A lifecycle analysis," *Commun. Transp. Res.*, vol. 1, p. 100022, 2021. doi: 10.1016/j.commtr.2021.100022
- [17] N. Kumar, S. Kumar, and S. P. Pandey, "Traffic-related air pollution and associated human health risk," *Macromol. Symp.*, vol. 404, no. 1, p. 2200486, 2023. doi: 10.1002/masy.202100486
- [18] S. Kaur, M. J. Nieuwenhuijsen, and R. N. Colville, "Pedestrian exposure to air pollution along a major road in Central London, UK," *Atmos. Environ.*, vol. 39, no. 38, pp. 7307-7320, 2005. doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.09.008
- [19] M. J. Nieuwenhuijsen, H. Khreis, E. Verlinghieri, and D. Rojas-Rueda, "Transport and health: A marriage of convenience or an absolute necessity," *Environ. Int.*, vol. 88, pp. 150-152, 2016. doi: 10.1016/j.envint.2015.12.033
- [20] World Health Organization, "Air pollution," 2021. Erişim: 2 Eylül 2024. Erişim adresi: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>
- [21] E. Lavigne *et al.*, "Spatiotemporal variations in ambient ultrafine particles and the incidence of childhood asthma," *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, vol. 199, no. 12, pp. 1487-1495, 2019. doi: 10.1164/rccm.201810-1976OC
- [22] Defra, Air Quality Expert Group, "Estimation of changes in air pollution emissions, concentrations and exposure during the COVID-19 outbreak in the UK: Rapid evidence review – June 2020," UK Air, Dep. Environ., Food Rural Aff., Jul. 1, 2020. Erişim: 2 Eylül 2024. Erişim adresi: https://uk-air.defra.gov.uk/library/reports?report_id=1005
- [23] Y. Barwise and P. Kumar, "Designing Vegetation Barriers for Urban Air Pollution Abatement: A Practical Review for Appropriate Plant Species Selection," *NPJ Clim. Atmos. Sci.*, vol. 3, no. 1, Art. No. 12, 2020. doi: 10.1038/s41612-020-0115-3

- [24] İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Çevre Koruma Müdürlüğü, "2022 İklim İzleme Raporu," İstanbul: İBB, 2023. Erişim: 5 Eylül 2024. Erişim adresi: <https://cevre.ibb.istanbul/wp-content/uploads/2023/04/2022-iklim-izleme-raporu-tr.pdf>
- [25] N. Aini and Z. Shen, "Design of tree planting pattern: Impacting on the road-air quality for pedestrians from CO_2 dispersion emitted from transportation," *Int. J. Sustain. Soc.*, vol. 12, no. 3, pp. 185–201, 2020. doi: 10.1504/IJSSOC.2020.108051
- [26] European Commission, "Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe," 2022. Erişim: 15 Ekim 2024. Erişim adresi: <https://ec.europa.eu/environment>
- [27] H. Özdemir and S. Yılmaz, "Assessment of green infrastructure planning in Turkish metropolitan cities," *Land Use Policy*, vol. 81, pp. 239–250, 2019.
- [28] EEA, "Air quality in Europe – 2022 Report," Eur. Environ. Agency, 2022. Erişim: 15 Ekim 2024. Erişim adresi: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022>
- [29] IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, 2021. Erişim: 18 Ekim 2024. Erişim adresi: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [30] US EPA, "Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2020," U.S. Environ. Prot. Agency, 2022. Erişim: 25 Ekim 2024. Erişim adrsi: <https://www.epa.gov/ghgemissions>
- [31] TÜİK, "Sera Gazı Emisyon İstatistikleri," Türkiye İstatistik Kurumu, 2022. Erişim: 30 Ekim 2024. Erişim adresi: https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2022-53701&utm_source=chatgpt.com
- [32] İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Çevre Koruma Müdürlüğü, "İstanbul İklim Değişikliği Eylem Planı 2020–2024," İstanbul: İBB, 2022. Erişim: 12 Kasım 2024. Erişim adresi: https://cevre.ibb.istanbul/wp-content/uploads/2022/01/ist_iklim_degisikligi_eylem_plani.pdf
- [33] EEA, "EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019," Eur. Environ. Agency, 2019. Erişim: 12 Kasım 2024. Erişim adresi: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- [34] TÜİK, "Motorlu Kara Taşıtları Temmuz 2025," Türkiye İstatistik Kurumu, 2025. Erişim: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Temmuz-2025-54043>
- [35] EMISIA, 2023. Erişim: 17 Aralık 2024. Erişim adresi: <https://www.emisia.com/>
- [36] P. Benson, "A review of the development and application of the CALINE 3 and 4 models," *Atmos. Environ.*, vol. 26B, no. 3, pp. 379–390, 1992

- [37] US EPA, *User's guide for the AMS/EPA regulatory model AERMOD*. U.S. Environmental Protection Agency, 2016. Erişim: 25 Aralık 2024. Erişim adresi: <https://nepis.epa.gov/Exe/>
- [38] US Environmental Protection Agency (US EPA), *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*. U.S. Environmental Protection Agency, 2016. Erişim: 12 Ocak 2025. Erişim adresi: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- [39] L. Ntziachristos and Z. Samaras, *COPERT 5: Computer programme to calculate emissions from road transport*. European Environment Agency, 2018.
- [40] USDA Forest Service, *i-Tree Eco user's manual (v.2022)*. 2022. Erişim: 02 şubat 2025 [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.itreetools.org>
- [41] UNECE, "Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP)," U.N. Econ. Comm. Eur., 2022. Erişim: 5 şubat 2025. Erişim adresi: <https://unece.org/environment-policy/air>
- [42] UNECE, "Gothenburg Protocol – 2012 Revised Text and Progress Report," U.N. Econ. Comm. Eur., 2023. Erişim: 5 şubat 2025. Erişim adresi: <https://unece.org/environment-policy/air/guidance>
- [43] European Commission, *Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe*. Brussels, European Union, 2008. Erişim: 10 şubat 2025. Erişim adresi: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj/eng>
- [44] M. Gül, V. Topay, and K. Öztaltın, "Kentsel yol ağaçlarının envanteri ve karbon tutma kapasiteleri," *Turk. J. Forest Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 516–535, 2021. doi: 10.32328/turjaf.957660
- [45] S. Park, J. Kim, S. Lee, and Y. Ryu, "Relationship between leaf traits and PM-capturing capacity of major urban-greening species," *Horticulturae*, vol. 8, no. 11, Art. No. 1046, 2022. doi: 10.3390/horticulturae8111046
- [46] Y. Chen *et al.*, "Foliar particulate matter retention and toxic trace element enrichment by urban greening plants in a subtropical city," *Sci. Rep.*, vol. 13, Art. No. 14437, 2023. doi: 10.1038/s41598-023-39975
- [47] H.-T. Ui, U. Odsuren, S.-Y. Kim, and B.-J. Park, "Particulate matter accumulation and leaf traits of ten woody species growing under different air pollution conditions in Cheongju city, South Korea," *Atmosphere*, vol. 13, no. 9, Art. No. 1351, 2022. doi: 10.3390/atmos13091351
- [48] A. Sæbø, R. Popek, B. Nawrot, H. M. Hanslin, H. Gawronska, and S. W. Gawronski, "Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces," *Sci. Total Environ.*, vol. 427–428, pp. 347–354, 2012. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.084
- [49] P. H. Freer-Smith, A. A. El-Khatib, and G. Taylor, "Capture of particulate pollution by trees: A comparison of species typical of semi-arid areas (*Ficus nitida* and *Eucalyptus globulus*) with European and North American species," *Water, Air, & Soil Pollut.*, vol. 155, no. 1, pp. 173–187, 2004. doi: 10.1023/B:WATE.0000026521.99552.f0

- [50] P. K. Rai, "Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 129, pp. 120–136, 2016. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.03.012
- [51] R. Baldauf, "Roadside vegetation design characteristics that can improve local, near-road air quality," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 52, pp. 354–361, 2017. doi: 10.1016/j.trd.2017.03.013
- [52] i-Tree Modeli, 2025. Erişim: 1 Mart 2025. Erişim adresi: https://www.fs.usda.gov/nrs/pubs/gtr/gtr_nrs200.pdf
- [53] U.S. Forest Service, "City of Ann Arbor, Michigan: Urban forest effects and values (i-Tree Eco analysis)," U.S. Dep. Agric., Forest Service, Northern Res. Station, 2014. Erişim: 5 Mart 2025. Erişim adresi: https://www.a2gov.org/media/rk0flnt2/annarbor_itreeecoreport.pdf
- [54] J. D. Sjöman *et al.*, "Expectations of i-Tree Eco as a tool for urban tree management in Nordic cities," *Front. Sustain. Cities Soc.*, 2024. doi: 10.3389/frsc.2023.1325039
- [55] M. Kiss, Á. Takács, R. Pogácsás, and Á. Gulyás, "Evaluating carbon sequestration and air pollution removal by street and park trees in Szeged (Hungary)," *Moravian Geogr. Rep.*, vol. 23, no. 3, pp. 36-46, 2015.
- [56] K. L. Hand and K. J. Doick, "i-Tree Eco as a tool to inform urban forestry in Great Britain: A literature review of its current application within urban forestry policy and management context," *Forest Res.*, 2018. Erişim: https://cdn.forestresearch.gov.uk/2022/02/fr_hand_itreeeval_lit_review_2018.pdf
- [57] S. Ercisli, "A review of plants used in landscape architecture in Turkey," *J. Appl. Sci.*, vol. 4, no. 4, pp. 482–486, 2004. doi: 10.3923/jas.2004.482.486
- [58] K. V. Abhijith *et al.*, "Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review," *Atmos. Environ.*, vol. 162, pp. 71–86, 2017. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.05.016
- [59] World Health Organization (WHO), *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: WHO Press, 2021. Erişim: 10 Mart 2025. Erişim adresi: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [60] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, "Ulusal Temiz Hava Eylem Planı 2020–2025," 2021. Erişim: 10 Mart 2025. Erişim adresi: <https://www.csb.gov.tr>
- [61] UNEP, "Actions on air quality: A global summary," U.N. Environ. Programme, 2020. Erişim: 15 Nisan 2025. Erişim adresi: <https://www.unep.org/resources/report/actions-air-quality-global-summary-policies-and-programmes-reduce-air-pollution>
- [62] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, "Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliğı," *Resmî Gazete*, no. 27277, 2021.

- Erişim: 16 Nisan 2025. Erişim adresi: https://havakalitesi.ibb.gov.tr/Files/CMS_Content/YON-26898HavaKalitesi-converted.pdf?utm_source
- [63] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, "Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı Raporları," 2023. Erişim: 16 Nisan 2025. Erişim adresi: <https://www.havaizleme.gov.tr>
- [64] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "İstanbul İli 2023 Çevre Durum Raporu," Ankara: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2023. Erişim: 21 Nisan 2025. Erişim adresi: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/istanbul-ilcdr-2023-20241230081046.pdf>
- [65] Ankara Büyükşehir Belediyesi, EGO Genel Müdürlüğü, "EGO Genel Müdürlüğü 2023 faaliyet raporu," 2023. Erişim: 2 Mayıs 2025. Erişim adresi: <https://www.ego.gov.tr/dosya/indir/32238.pdf>
- [66] Ankara Büyükşehir Belediyesi, "GCAP Raporu – Ankara (EBRD Green Cities)," 2022. Erişim: 2 Mayıs 2025. Erişim adresi: https://ebrdgreencities.com/assets/Uploads/PDF/Ankara_GCAP_Final_TUR.pdf
- [67] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "İzmir İli 2020 Çevre Durum Raporu," Ankara: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021. Erişim: 10 Mayıs 2025. Erişim adresi: https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/2020_-zm-r_cdr-20210622145856.pdf
- [68] İzmir Büyükşehir Belediyesi, "Yeşil Altyapı Stratejisi" 2019. Erişim: 10 Mayıs 2025. Erişim adresi: <https://izmirdoga.izmir.bel.tr/CKYuklenen/%C4%B0zmirYe%C5%9FilAltYap%C4%B1Stratejisi.pdf>
- [69] İzmir Büyükşehir Belediyesi & EBRD Green Cities, "İzmir Yeşil Şehir Eylem Planı (GCAP)," İzmir: İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2020. Erişim: 10 Mayıs 2025. Erişim adresi: https://ebrdgreencities.com/assets/Uploads/PDF/Izmir-GCAP-report_FINAL-ISSUED-TURK.pdf
- [70] Bursa Büyükşehir Belediyesi, "Bursa Temiz Hava Eylem Planı Güncelleme Raporu," 2022. Erişim: 15 Mayıs 2025. Erişim adresi: https://www.bursa.bel.tr/dosyalar/meclis_karar_yeni/18457_MEC2022-4_152.pdf
- [71] BURULAŞ, "Ulaşım Altyapısı ve Araç Envanteri Raporu," 2023. Erişim: 15 Mayıs 2025. Erişim adresi: <https://www.bursa.bel.tr/dosyalar/yayinlar/2lmb1z43uz8kocg.pdf>
- [72] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, "Hava Kalitesi İzleme Raporu – Şubat 2025," 2025. Erişim: 15 Mayıs 2025. Erişim adresi: https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/subat-2025_bulten-raporu-20250407164155.pdf

- [73] D. J. Nowak, S. Hirabayashi, A. Bodine, and E. Greenfield, "Variations in urban forest allergy potential based on pollen production," *Urban Forest. Urban Green.*, vol. 59, p. 127001, 2021. doi: 10.1016/j.ufug.2021.127001
- [74] W. Kuttler, "The urban climate – Basic and applied aspects," in *Urban Ecology*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2008, pp. 233–248
- [75] S. Lee and R. Anderson, "Restoration of the Cheonggyecheon Stream and urban thermal environment in Seoul," *J. Environ. Manage.*, vol. 129, pp. 512–521, 2013.
- [76] F. Orsini *et al.*, "Vertical green systems and urban air quality," *Urban For. Urban Green.*, vol. 13, no. 2, pp. 197–204, 2014.
- [77] P. Y. Tan, J. Wang, and A. Sia, "Perspectives on five decades of the urban greening of Singapore," *Cities*, vol. 72, pp. 142–151, 2018.
- [78] Ö. Ertekin and İ. Taş, "Urban green infrastructure practices in Turkey: Evaluation and recommendations," *J. Urban Plan. Dev.*, vol. 146, no. 4, pp. 1–11, 2020.
- [79] A. Gül and V. Küçük, "Urban forest ecosystem services in Istanbul," *Ecol. Indic.*, vol. 131, pp. 108–119, 2021.
- [80] G. Çakır and A. Aksoy, "Roadside vegetation and its effects on air pollution in metropolitan Ankara," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 190, no. 5, pp. 1–14, 2018
- [81] S. Demirkol and O. Uzun, "Climate-sensitive landscape design strategies for Mediterranean cities: The case of İzmir," *Urban For. Urban Green.*, vol. 24, pp. 157–166, 2017.
- [82] H. Yılmaz and E. Öner, "Evaluating ecological corridors in Bursa using topographic and climatic features," *Environ. Manage.*, vol. 58, no. 3, pp. 354–365, 2016.
- [83] K. Şahin and E. Doğan, "Effects of afforestation on dust reduction in Central Anatolia," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 27, pp. 34018–34029, 2020.
- [84] EBRD, *Gaziantep Green City Action Plan*. European Bank for Reconstruction and Development, 2021. Erişim: 1 Haziran 2025. Erişim adresi: <https://www.ebrd.com/home/news-and-events/news/2021/gaziantep-commits-to-climate-action-as-part-of-ebrd-green-cities.html>
- [85] Eskişehir Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, "Eskişehir İli 2021 Yılı Çevre Durum Raporu," 2021. Erişim: 1 Haziran 2025. Erişim adresi: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/esk-seh-r -cdr2021-20220727141540.pdf>
- [86] ESHOT Genel Müdürlüğü, "Elektrikli otobüslerin saha verileri: dizel otobüslere göre verimlilik ve çevresel kazanımlar," 2017. Erişim: 1 Haziran 2025. Erişim adresi: https://www.emo.org.tr/ekler/c79bb4342b938c9_ek.pdf
- [87] W. Jaung, L. R. Carrasco, S. F. E. A. Shaikh, P. Y. Tan, and D. R. Richards, "Temperature and air pollution reductions by urban green spaces are highly valued in a tropical city-state," *Urban Forest. Urban Green.*, vol. 55, p. 126827, 2020. doi: 10.1016/j.ufug.2020.126827

- [88] Greater London Authority, "London Environment Strategy: Air Quality Chapter," 2018/2022. Erişim: 1 Haziran 2025. Erişim adresi: https://www.london.gov.uk/sites/default/files/london_environment_strategy_0.pdf
- [89] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2025. Erişim: 10 Haziran 2025. Erişim adresi: https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/mart-2025_bulten-raporu-1-20250506164047.pdf
- [90] İstanbul Büyükşehir Belediyesi, "Hava Kalitesi İzleme Merkezi," 2025. Erişim: 10 Haziran 2025. Erişim adresi: <https://cevre.ibb.istanbul/hava-kalitesi/hava-kalitesi-izleme-merkezi/>
- [91] *Atmospheric Measurement Techniques*, 2025. Erişim: 1 Temmuz 2025. Erişim adresi: <https://www.atmospheric-measurement-techniques.net/>
- [92] Anadolu Ajansı, "Türkiye'nin hava kalitesi artık anlık izlenebiliyor," Feb. 20, 2025. Erişim: 1 Temmuz 2025. Erişim adresi: <https://www.aa.com.tr/tr/gundem/turkiyenin-hava-kalitesine-anlik-takip/3467634>
- [93] Times of India, "BMC to upgrade dust sampler units in Mumbai," 2025. Erişim: 2 Temmuz 2025. Erişim adresi: <https://timesofindia.indiatimes.com/city/mumbai/bmc-to-upgrade-its-dust-sampler-units-at-5-locations-in-mumbai-for-better-air-quality-monitoring/articleshow/123683484.cms>
- [94] Javan, F.D., F. Samadzadegan, & A. Toosi, "Air pollution observation—bridging spaceborne to unmanned airborne remote sensing: a systematic review and meta-analysis," *Air Qual Atmos Health*, vol. 18, pp. 2481–2549, 2025. doi: 10.1007/s11869-025-01771-y
- [95] H. Relvas, D. Lopes, and J. M. Armengol, "Empowering communities: Advancements in air quality monitoring and citizen engagement," *Urban Clim.*, vol. 60, p. 102344, 2025. doi: 10.1016/j.uclim.2025.102344
- [96] S. Shahid *et al.*, "Innovations in Air Quality Monitoring: Sensors, IoT and Future Research," *Sensors*, vol. 25, no. 7, Art. No. 2070, 2025. doi: 10.3390/s25072070
- [97] T. Johnson and K. Woodward, "Enviro-IoT: Calibrating low-cost environmental sensors in urban settings," arXiv preprint, arXiv:2502.07596, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2502.07596
- [98] S. Gulia, S. M. Shiva Nagendra, M. Khare, and I. Khanna, "Urban air quality management — a review," *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 286-304, 2015. doi: 10.5094/APR.2015.033
- [99] J. Liao and H. Y. Kim, "The relationship between green infrastructure and air pollution, history, development, and evolution: A bibliometric review," *Sustainability*, vol. 16, no. 16, Art. No. 6765, 2024. doi: 10.3390/su16166765
- [100] R. Beelen *et al.*, "Development of NO and NOx land use regression models for estimating air pollution exposure in 36 study areas in Europe – The ESCAPE

- project," *Atmos. Environ.*, vol. 72, pp. 10–23, 2013. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.02.033
- [101] Y. Zhou and J. I. Levy, "Factors influencing the spatial extent of mobile source air pollution impacts: a meta-analysis," *BMC Public Health*, vol. 7, Art. No. 89, 2007. doi: 10.1186/1471-2458-7-89
- [102] A. J. Cimorelli *et al.*, "AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part I: General model formulation and boundary layer characterization," *J. Appl. Meteorol.*, vol. 44, no. 5, pp. 682–693, 2005. doi: 10.1175/JAM2227.1
- [103] F. Creutzig *et al.*, "Transport: A roadblock to climate change mitigation?," *Science*, vol. 350, no. 6263, pp. 911–912, 2015. doi: 10.1126/science.aac8033
- [104] İBB, 2025. Erişim: 5 Temmuz 2025. Erişim adresi: <https://havakalitesi.ibb.gov.tr/Pages/AirQualityDetails/08fa75a5-277b-4562-bf51-be549c9a25a2>
- [105] AQI.in, "Real-time air quality for Goztepe. 2025. Erişim: 5 Temmuz 2025. Erişim adresi: <https://www.aqi.in/dashboard/turkey/istanbul-province/istanbul/goztepe>
- [106] AQICN.org, "Goztepe, Turkey Real-time Air Quality Index,". 2025. Erişim: 1 Ağustos 2025. Erişim adresi: <https://aqicn.org/city/turkey/istanbul/goztepe/>
- [107] G. Kannan and R. Sivakumar, "Green supplier selection and order allocation in a low-carbon paper industry: Integrated multi-criteria heterogeneous decision-making and multi-objective linear programming approaches," *Ann. Oper. Res.*, vol. 238, no. 1, pp. 243–276, 2016. doi: 10.1007/s10479-015-2004-4
- [108] E. K. Zavadskas, Z. Turskis, and S. Kildienė, "State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods," *Technol. Econ. Dev. Econ.*, vol. 20, no. 1, pp. 165–179, 2014. doi: 10.3846/20294913.2014.892037
- [109] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, 1980.
- [110] E. Triantaphyllou, *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Springer, 2000. doi: 10.1007/978-1-4757-3157-6
- [111] C. Kahraman, U. Cebeci, and D. Ruan, "Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 87, no. 2, pp. 171–184, 2004. doi: 10.1016/S0925-5273(03)00099-9
- [112] E. Fontela and A. Gabus, *The DEMATEL Observer*. Geneva Res. Inst., 1976.
- [113] M. A. S. A. Abdulrahman and F. T. Dweiri, "A systematic literature review and thematic analysis of DEMATEL in transport systems," *Open Transp. J.*, vol. 19, Art. No. e26671212385655, 2025.
- [114] W. W. Wu, "Choosing knowledge management strategies by using a combined ANP and DEMATEL approach," *Expert Syst. Appl.*, vol. 35, no. 3, pp. 828–835, 2008. doi: 10.1016/j.eswa.2007.07.025

- [115] V. Kersulienė, E. K. Zavadskas, and Z. Turskis, "Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA)," *J. Bus. Econ. Manag.*, vol. 11, no. 2, pp. 243–258, 2010. doi: 10.3846/jbem.2010.12
- [116] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 27, pp. 379–423, 1948.
- [117] H. V. Dedania, V. R. Shah, and R. C. Sanghvi, "Portfolio Management: Stock Ranking by Multiple Attribute Decision Making Methods," *Technol. Invest.*, vol. 6, no. 4, pp. 141–150, 2015. doi: 10.4236/ti.2015.64016
- [118] J. C. Bravo-Bello, M. L. Ortiz-Moreno, and M. R. Pineda-Cortel, "The analytic hierarchy process for selection of suitable trees in urban areas," *Urban Forest. Urban Green.*, vol. 47, p. 126541, 2020. doi: 10.1016/j.ufug.2019.126541
- 46[119] S. Ghafari, S. G. Jalali, and P. Attarod, "Ecological potentials of trees, shrubs and hedge species in urban environments: A multi-criteria decision analysis," *Urban Forest. Urban Green.*, vol. 49, p. 126612, 2020. doi: 10.1016/j.ufug.2020.126612
- [120] R. Sousa-Silva, J. P. Honrado, and Â. Lomba, "Strong variations in urban allergenicity riskscapes: Implications for environmental justice," *Environ. Res. Lett.*, vol. 16, no. 8, Art. No. 084012, 2021. doi: 10.1088/1748-9326/ac12a5
- [121] M. Zengin, *Peyzaj Planlamada TOPSİS Yöntemi ve Erzurum Örneği*. Atatürk Üniv. Yayınları, 2016.
- [122] E. Ustaoglu, A. C. Aydinoglu, and B. Caglayan, "Site suitability analysis for green space development using fuzzy set and AHP: The case of Istanbul," *Ecol. Indic.*, vol. 117, p. 106527, 2020. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106527
- [123] M. Köse, Z. Demir, and S. Çelik, "R'WOT-based strategic planning and management for urban forests: The case of Istanbul," *Sustainability*, vol. 17, no. 5, Art. No. 2458, 2025. doi: 10.3390/su17052458
- [124] G. A. Aksu, R. Erdoğan, and N. Kaya, "Evaluation of artificial surface–urban ecosystem relations by using AHP: The case of Istanbul," *Forestist*, vol. 73, no. 2, pp. 123–132, 2023. doi: 10.5152/forestist.2023.23024
- [125] A. Nesticò, M. R. Guarini, and F. Sica, "Multi-criteria methods for the optimal localization of urban parks," *Land Use Policy*, vol. 114, p. 105994, 2022. doi: 10.1016/j.landusepol.2021.105994
- [126] C. P. Kpadé, B. Tchatchou, and A. Ngomanda, "Evaluating multi-criteria decision-making methods for forest management: A systematic review," *Forest Policy Econ.*, vol. 154, p. 103129, 2024. doi: 10.1016/j.forpol.2023.103129
- [127] M. Carol-Aristizabal, A. Roldán, and J. Osorio, "Which tree species best withstand urban stressors? Evidence from expert-based multi-criteria assessments," *Urban Forest. Urban Green.*, vol. 92, p. 128015, 2024. doi: 10.1016/j.ufug.2024.128015

- [128] M. Gašparović, D. Medak, and T. Novák, "Mapping allergenic tree species in highly urbanized areas using remote sensing data," *Ecol. Indic.*, vol. 149, p. 110195, 2023. doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110195
- [129] C. L. Hwang and K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag, 1981.

EKLER

EK 1 – Uzman Anket Formu (ÇKKV Yöntemlerine Yönelik)

Bu anket formu, kentsel yeşil altyapı planlamasında kullanılan bitki türlerinin çevresel, peyzaj ve ekonomik kriterler açısından değerlendirilmesi amacıyla hazırlanmıştır. Form, DEMATEL, SWARA ve TOPSIS yöntemleri kapsamında uzman görüşlerini toplamak için tasarlanmıştır.

Tablo EK 1. 1 Uzman Bilgileri

Ad – Soyad	
Görev / Uzmanlık Alanı	
Kurum / Kuruluş	
Deneyim Süresi (yıl)	
Eğitim Durumu	
İletişim (e-posta)	

Tablo EK 1. 2 Kriter Seti

Kod	Kriter Adı
C ₁	Emisyon Azaltım Kapasitesi
C ₂	Tesis Aşaması Maliyet Etkinliği
C ₃	Bakım Maliyeti
C ₄	Rüzgar Önleme Yeteneği
C ₅	Gürültü Azaltma (Bariyer Özelliği)
C ₆	Trafik Güvenliği Etkisi
C ₇	Tohum/Çiçek Döküntüsü
C ₈	Estetik Değer / Peyzaj Uyumu
C ₉	Su Tutma Kapasitesi
C ₁₀	Toprak Toleransı
C ₁₁	İklimsel Dayanıklılık
C ₁₂	Yerel Biyoçeşitliliğe Katkı

Tablo EK 1. 3 Kriterler arası nedensellik ilişkisi (DEMATEL)

C ₁	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
C ₂												
C ₃												
C ₄												
C ₅												
C ₆												
C ₇												
C ₈												
C ₉												
C ₁₀												
C ₁₁												
C ₁₂												

Kriterler arasındaki etkileşim düzeyini belirlemek (sebeupsonuç ilişkisi) için Tablo EK 1.3’de 12×12 satırdaki kriterin sütundaki kriter üzerindeki etkisini 0–4 arasında puanlayınız. 0=Etkisiz, 1=Düşük etki, 2=Orta etki, 3=Yüksek etki, 4=Çok yüksek etki.

Tablo EK 1. 4 Kriter ağırlıklarının belirlenmesi (SWARA)

Sıra	Kriter	s _j	k _j	q _j	w _j
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

Kriterlerin görelî önem derecelerini belirlemek ve 12 kriteri önem sırasına göre (1=en önemli, 12=en az önemli) sıralayınız. Ardından, her kriterin bir önceki kritere göre önem farkını (s_j) belirtiniz (0–1 arası).

Tablo EK 1. 5 Kriter bazında puanlama (TOPSIS)

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
Uzman Puanı												

Her kriter için 1–9 arasında puanlama yapınız (9=en uygun, 1=en zayıf). C₂ ve C₃ maliyet kriterleri analizde ters çevrilecektir.

Bu anket, Bandırma D-100 karayolu koridoru özelinde yürütülen “Büyükşehir Ulaşım Koridorlarında Emisyon Yönetimi İçin Yerel Bitki Dokusuna Dayalı Bir Model Önerisi: D-100 Karayolu Göztepe Kavşağı Örneği” başlıklı doktora çalışması kapsamında kullanılacaktır. Toplanan veriler yalnızca bilimsel analiz amacıyla kullanılacaktır.

Uzman Adı-Soyadı: _____

İmza / Tarih: _____



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Sezer ÜNAL

Eğitim Bilgileri:

Lisans: Trakya Üniversitesi/ Tekirdağ Ziraat Fakültesi/Peyzaj Mimarlığı Bölümü 2008

Yüksek Lisans: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi/ Mimarlık ve Tasarım Fakültesi/ Peyzaj Mimarlığı Bölümü 2020

Doktora: Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi/Akıllı Ulaşım sistemleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı/ Akıllı Ulaşım sistemleri ve Teknolojileri Programı

Araştırma Alanları:

Akademik Çalışmalar:

[1] S. Ünal, N. Tektaş, and M. Tektaş, "Bandırma Urban Highway Transportation-Related Emissions and Green Infrastructure," *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, vol. 10, no. 4, pp. 381–391, 2025. Erişim: <https://doi.org/10.35229/jaes.1637057>

[2] S. Ünal, N. Tektaş, and M. Tektaş, "Kentsel Yeşil Alanların Peyzaj Değerleri, Ulaşım ve Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirilmesi: Bandırma Örneği," *PEYZAJ - Eğitim, Bilim, Kültür ve Sanat Dergisi*, vol. 7, no. 2, pp. 93–113, 2025. Erişim: <https://doi.org/10.53784/peyzaj.1718404>