

T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTSEL HAREKETLİLİK KAPSAMINDA
DÜŞÜK KARBONLU TOPLU TAŞIMA SİSTEMİNE GEÇİŞ VE
FAYDA-MALİYET ANALİZİ: ANTALYA İLİ ÖRNEĞİ

Merve FELEK

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Buket ÇAPALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ŞEHİR VE BÖLGE PLANLAMA ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2025



© 2025 [Merve FELEK]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAYI	i
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi	2
1.2. Araştırma Soruları	4
1.3. Araştırma Hipotezleri	5
2. LİTERATÜR TARAMASI	6
2.1. Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik: Kavramsal Çerçeve	6
2.1.1. Sürdürülebilir kentsel hareketlilik tanımı, boyutu ve kriterleri	8
2.1.2. Uluslararası uygulamalar ve politikalar	11
2.2. Düşük Karbonlu Toplu Taşıma Sistemleri ve Teknolojileri	13
2.2.1. Elektrikli araç teknolojileri ve özellikleri	14
2.2.2. Fosil yakıtlı ve alternatif yakıtlı taşıtların karşılaştırması	16
2.2.3. Hibrit ve tam elektrikli sistemlerin performans analizi	19
2.3. Ekonomik Değerlendirme Yöntemleri	22
2.3.1. Fayda-maliyet analizi: teorik temeller	23
2.3.2. Türkiye'de ulaşım projelerinin ekonomik değerlendirmeleri	26
2.4. Karbon Emisyonları ve Çevresel Etkiler	29
2.4.1. Ulaşım kaynaklı hava kirliliği ve toplumsal etkileri	29
2.4.2. Toplu taşıma sistemlerinin karbon emisyonlarına etkisi	32
2.4.3. İklim değişikliği ve kentsel hareketlilik arasındaki ilişki	35
3. YÖNTEM	38
3.1. Araştırma Yaklaşımı ve Modeli	38
3.2. Veri Toplama Yöntemleri	39
3.3. Veri Analiz Teknikleri	41
3.4. Fayda-Maliyet Analizi Metodolojisi	43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	46
4.1. Antalya İli Toplu Taşıma Sisteminin Mevcut Durum Analizi	46
4.1.1. Toplu taşıma altyapısı ve araç filosunun özellikleri	46
4.1.2. Ulaşım talebi ve yolcu profil analizi	49
4.1.3. Mevcut sistemin karbon emisyonları ve çevresel etkiler	51
4.1.4. Yürürlükteki ulaşım politikalar ve stratejiler	58
4.2. Düşük Karbonlu Toplu Taşıma Teknolojilerinin Değerlendirilmesi	63
4.2.1. Tam elektrikli otobüs sistemleri	63
4.2.2. LPG yakıtlı araçların performans analizi	68
4.2.3. Hibrit teknolojilerin uygulanabilirliği	71
4.2.4. Aktif ulaşım modlarının entegrasyonu (bisiklet ve yaya ulaşımı)	73
4.3. Ekonomik Değerlendirme: Fayda-Maliyet Analizi Sonuçları	78
4.3.1. Maliyet bileşenleri: yatırım, işletme ve bakım	78
4.3.1.1. İlk yatırım ve işletme maliyetleri	79
4.3.1.2. Bakım ve onarım maliyetleri	89

4.3.2. Fayda bileşenleri: emisyon azaltımı, enerji tasarrufu, sağlık ve sosyal faydalar	93
4.3.2.1. Emisyon Azaltımı	94
4.3.2.2. Enerji verimliliği ve yakıt tasarrufu	95
4.3.2.3. Kentsel hava kalitesi iyileşmesi ve halk sağlığına katkıları.....	96
4.3.2.4. Gürültü kirliliği ve trafik kaynaklı stresin azalması.....	97
4.3.2.5. Sosyal eşitlik ve kentsel yaşam kalitesi artışı	98
4.3.3. Ekonometrik analiz sonuçları.....	100
4.3.3.1. Maliyet ve fayda bileşenlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi	100
4.3.3.2. Zaman perspektifinden değerlendirme.....	101
4.4. Uygulama Stratejileri ve Politikalar.....	102
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	104
5.1. Araştırma Bulguları ve Sonuçlar.....	104
5.2. Uygulama Stratejileri ve Politika Önerileri.....	109
5.2.1. Sürdürülebilir ulaşım için önerilen politika çerçevesi	117
5.2.2. Finansman mekanizmaları ve teşvik sistemleri	121
5.2.3. Çok paydaşlı katılım ve toplumsal farkındalık stratejileri	126
5.2.4. Aşamalı uygulama planı ve zaman çizelgesi	131
KAYNAKLAR.....	137
ÖZGEÇMİŞ	146

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTSEL HAREKETLİLİK KAPSAMINDA DÜŞÜK KARBONLU TOPLU TAŞIMA SİSTEMİNE GEÇİŞ VE FAYDA-MALİYET ANALİZİ: ANTALYA İLİ ÖRNEĞİ

Merve FELEK

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Şehir ve Bölge Planlama Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Buket ÇAPALI

Bu çalışma, sürdürülebilir kentsel hareketlilik bağlamında düşük karbon salınımlı toplu taşıma sistemlerine geçiş sürecinin ekonomik, çevresel ve toplumsal etkilerini fayda-maliyet analizi yöntemi ile değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Günümüz kentlerinin karşı karşıya kaldığı çevresel krizler, artan enerji tüketimi ve fosil yakıt bağımlılığı, toplu taşıma sistemlerinde karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik dönüşüm politikalarını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, araştırma Antalya ili örneğinde, mevcut dizel ve LPG yakıtlı otobüs filosunun elektrikli otobüslere dönüştürülmesinin uygulanabilirliğini, kısa ve uzun vadeli etkilerini çok boyutlu bir analiz çerçevesinde ele almıştır.

Araştırmada öncelikle sürdürülebilir kentsel hareketlilik kuramsal olarak irdelenmiş; literatürdeki güncel uygulamalar ve uluslararası politikalar analiz edilerek düşük karbonlu toplu taşıma sistemlerinin başarı örnekleri incelenmiştir. Çalışmanın uygulama kısmında ise Antalya ili toplu taşıma sistemi verileri kullanılarak elektrikli otobüslerin çevresel performansı ile ekonomik maliyet ve faydaları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu doğrultuda, fayda-maliyet analizinde çevresel faydalar kapsamında karbon salınımindaki azalma, hava kalitesi iyileşmesi ve toplumsal sağlık kazanımları dikkate alınırken; maliyet unsurları içerisinde ise araç temini, altyapı yatırımı ve işletme giderleri analiz edilmiştir.

Çalışma bulguları, elektrikli otobüslerin ilk yatırım maliyetlerinin fosil yakıtlı taşıtlara göre yüksek olmasına rağmen, uzun vadede düşük işletme giderleri ve çevresel faydaları sayesinde ekonomik sürdürülebilirlik açısından daha avantajlı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, karbon emisyonlarının önemli oranda azalacağı tespit edilmiş ve bu durumun kentsel hava kalitesi ile halk sağlığı üzerinde olumlu etkiler yaratacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir kentsel hareketlilik, toplu taşıma, düşük karbon, fayda maliyet analizi, sürdürülebilir çevre,

2025, 146 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

TRANSITION TO LOW CARBON PUBLIC TRANSPORTATION SYSTEM AND COST-BENEFIT ANALYSIS WITHIN THE SCOPE OF SUSTAINABLE URBAN MOBILITY: THE CASE OF ANTALYA PROVINCE

Merve FELEK

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of City and Regional Planning**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Buket ÇAPALI

This study aims to evaluate the economic, environmental, and social impacts of the transition to low-carbon public transport systems within the context of sustainable urban mobility using the cost-benefit analysis method. The environmental crises, increasing energy consumption, and fossil fuel dependency faced by today's cities necessitate transformation policies aimed at reducing carbon emissions in public transportation systems. In this context, the research has addressed the feasibility of converting the existing diesel and LPG-fueled bus fleet to electric buses in the example of Antalya province, considering both short-term and long-term effects within a multidimensional analysis framework.

In the research, sustainable urban mobility was primarily examined theoretically; current practices in the literature and international policies were analyzed, and successful examples of low-carbon public transportation systems were studied. In the practical part of the study, the environmental performance of electric buses was comparatively analyzed with their economic costs and benefits using data from the public transportation system of Antalya province. In this context, the benefit-cost analysis considered environmental benefits such as the reduction in carbon emissions, improvement in air quality, and public health gains, while the cost components analyzed included vehicle procurement, infrastructure investment, and operating expenses.

The study findings revealed that although the initial investment costs of electric buses are higher than those of fossil fuel vehicles, they are more advantageous in terms of economic sustainability in the long run due to lower operating expenses and environmental benefits. Additionally, it has been determined that carbon emissions will significantly decrease, leading to the conclusion that this will have positive effects on urban air quality and public health.

Keywords: Sustainable urban mobility, public transportation, low carbon, cost-benefit analysis, sustainable environment

2025, 146 pages

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bilgi, tecrübe ve rehberlikleri ile bana yol gösteren, akademik gelişimime katkı sunan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Buket Çapalı'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Hocam, araştırmamın her aşamasında gösterdiği sabır, titiz bilimsel yaklaşımı ve kıymetli yönlendirmeleri ile bu çalışmanın akademik niteliğinin artmasına önemli katkılar sağlamıştır.

Tez sürecinde akademik anlamda bilgi paylaşımı ve yönlendirmeleriyle bana destek olan, bilimsel bakış açımı geliştirmeme katkıda bulunan Süleyman Demirel Üniversitesi Şehir ve Bölge Planlama Anabilim Dalı'nın değerli öğretim üyelerine de teşekkür ederim.

Tez sürecinde gerek manevi desteği gerekse sabır ve anlayışıyla yanımda olan sevgili aileme; özellikle eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan anneme ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onların desteği ve fedakarlıkları olmasaydı bu süreci bu denli verimli ve başarılı bir şekilde tamamlamam mümkün olamazdı.

Son olarak, bu zorlu süreçte moral ve motivasyon kaynağım olan başta eşim SİNAN FELEK'e, dostlarıma ve çalışma arkadaşlarıma, bana gösterdikleri anlayış ve verdikleri moral desteği için teşekkür eder; akademik hayatımda bu çalışmanın yeni başlangıçlar için bir adım olmasını temenni ederim.

Merve FELEK
ISPARTA, 2025

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Sıfır Emisyonlu Otobüs (ZEB) Teknoloji Maliyetleri (AC Transit, 2020)	80
Çizelge 4.2. İlk yatırım maliyeti (Nunno, 2018)	81
Çizelge 4.3. SWOT Analizi	102



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BRT Hızlı otobüs taşımacılığı sistemi
CO₂ Karbondioksit
FMA Fayda-maliyet analizi



1. GİRİŞ

Şehirleşme, insanlık tarihi boyunca ekonomik, sosyal ve kültürel dinamikleri şekillendiren en önemli süreçlerden biri olmuştur. Ancak 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren hız kazanan sanayileşme, artan nüfus ve kentleşme oranları, şehirlerin çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik açısından ciddi sorunlarla karşılaşmasına neden olmuştur (Karadaş, 2008). Modern kentlerin büyümesi, enerji tüketiminin artması ve çevresel kaynakların hızla tükenmesi, şehirlerin yalnızca ekonomik merkezler değil, aynı zamanda çevresel krizlerin odağı haline gelmesine yol açmıştır (Akkaya, 2023). Bu bağlamda, sürdürülebilir kentsel hareketlilik, çevresel bozulmayı önlemek ve şehirleri daha yaşanabilir hale getirmek için kritik bir strateji olarak öne çıkmaktadır.

Enerji tüketimi, kentsel alanlarda karşılaşılan en büyük zorluklardan biridir. Fosil yakıtların yoğun kullanımı, karbon emisyonlarının temel kaynağı olarak iklim değişikliğini hızlandırmaktadır (Çelik, 2022). Bu durum, yalnızca çevresel etkilerle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda sosyal eşitsizlikleri ve ekonomik maliyetleri de artırmaktadır. İklim değişikliği, kentlerde hava kirliliği, aşırı sıcaklıklar ve sel gibi sorunlara neden olarak, şehirlerin altyapısını ve toplumsal dayanıklılığını zayıflatmaktadır. Bu nedenle, kentsel hareketlilik sistemlerinin sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yeniden tasarlanması, gelecekteki nesillerin yaşam kalitesini garanti altına almak için bir zorunluluk haline gelmiştir (Kaya, 2018).

Antalya gibi hızlı büyüyen ve turizmle ekonomik dinamikleri şekillenen şehirlerde, kentsel hareketlilik ve enerji tüketimi arasındaki ilişki daha da kritik bir önem taşımaktadır. Antalya'nın ulaşım altyapısı, hızla artan nüfus ve turizm talebiyle başa çıkmak zorundadır. Bununla birlikte, şehirdeki ulaşım sistemlerinin büyük ölçüde fosil yakıtlı taşıtlara dayanması, hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği tehdit etmektedir. Bu bağlamda, toplu taşıma sistemlerinde düşük karbonlu teknolojilere geçiş, hem Antalya'nın karbon emisyonlarını azaltmak hem de şehirdeki ulaşım deneyimini iyileştirmek için önemli bir fırsat sunmaktadır. Ancak, bu dönüşümün maliyetleri ve uygulanabilirliği, dikkatlice analiz edilmesi gereken karmaşık bir problem alanıdır.

Kentsel hareketlilik, yalnızca bireylerin fiziksel yer değiştirmesiyle sınırlı olmayan, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve çevresel dinamikleri etkileyen çok boyutlu bir kavramdır. Toplu taşıma sistemlerinin düşük karbonlu teknolojilerle donatılması, bu dinamiklerin sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesine olanak tanımaktadır. Elektrikli otobüsler, tramvaylar ve bisiklet yolları gibi yenilikçi çözümler, bireysel araç kullanımını azaltarak karbon salınımını düşürmekte ve enerji verimliliğini artırmaktadır. Ancak bu tür çözümlerin benimsenmesi, yalnızca teknolojik yeniliklerle değil, aynı zamanda politik irade, kamu farkındalığı ve ekonomik yatırımlarla desteklenmelidir (Tilkioğlu, 2019).

Bu araştırmanın temel amacı, Antalya ili toplu taşıma sisteminde düşük karbonlu teknolojilere geçişin çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerini anlamaktır. Elektrikli otobüslerin mevcut dizel ve LPG'li otobüslerin yerini alması durumunda ortaya çıkabilecek karbon emisyonu azalmalarını ve maliyet avantajlarını belirlemek, bu çalışmanın odak noktalarından biridir. Bunun yanı sıra, bu dönüşümün Antalya halkının yaşam kalitesi üzerindeki etkilerini ve yerel yönetimlerin bu süreci destekleme kapasitesini değerlendirmek, araştırmanın kapsamını genişletmektedir. Çalışma, hem teorik hem de uygulamalı bir yaklaşım benimseyerek, sürdürülebilir kentsel hareketlilik politikalarının yerel düzeyde nasıl uygulanabileceğine dair somut bir çerçeve sunmayı hedeflemektedir.

1.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Kentlerin nüfusu, kentsel yaşamın avantajlarından ve hizmetlere ulaşımında sağlanan kolaylıktan dolayı gün geçtikçe artmaktadır. Nüfusun bu artışı kentin avantajlarını gün geçtikçe kaybetmesine neden olmaktadır. Gerek kaynakların verimli kullanılması gerekse mevcut sistemdeki olumsuzlukların düzenlenmesi ve dönüşümündeki endişelerden ötürü çözümlere ulaşmak her gün daha güç hale gelmektedir (Alp, 2022). Enerji tüketiminin en fazla olduğu kentsel mekanlar enerji kullanımından ve kullanılan enerjinin türünden dolayı iklim değişikliğinin başlıca sebepleri arasında gösterilen karbon salınımının en yoğun olduğu alanlardır. Dünyamız üzerinde iklim değişikliği kaynaklı birçok sorun ve hatta afetler meydana gelmekte olup iklim değişikliğine sebep olan konular üzerinde dünya çapında çalışmalar başlamış ve hızla önlemler alınmaktadır (Erkan, 2008). Bunun en güzel örneklerinden biri olarak Almanya'da en

büyük otomobil üreticisi olarak bilinen Volkswagen firması 2025 yılında dizel araçların üretimini durduracağını açıklamıştır. Bu durum ülkemizde ve dünya çapında motorlu taşıtların kullandıkları yakıttan dolayı doğaya verdikleri zarar fark edilmiş ve elektrikli araçların da günümüz teknolojisiyle kullanılmasının artmasıyla karbon emisyonu ile mücadele konusunda büyük adımlar atılmıştır. Geline bu noktada kentsel mekanlar arasındaki yaya ve araçların yer değiştirmesiyle oluşan kentsel hareketlilik, kentsel mekanlarda oluşan karbon salınımının başlıca aktörü olmaktadır. Kentsel hareketlilik kapsamında ulaşımı oluşturan iki ana ulaşım çeşidi kullanılmaktadır. Bunlar; bireysel araçlar (motorlu taşıtlar, elektrikli scooterler, bisikletler vb.) ve toplu taşıma araçları (motorlu taşıtlar, tramvaylar, metrolar vb.) dır (Alpay, 2023).

Kentsel hareketliliğin sürdürülebilirlik çerçevesinde gerek revize edilmesi gerek değiştirilmesi hususunda alternatif ulaşım araçları olanakları bağlamında bireysel taşıtların dönüşümünün zorluğu sebebi ile tek elden yönetilen ve kamu yararı için çalışan toplu taşıma araçları sürdürülebilir kentsel hareketliliğe geçişte en büyük potansiyele sahiptir (Örselli ve Dinçer, 2019). Söz konusu bu dönüşümün sağlanması önündeki en büyük endişenin günümüz ekonomik koşullarında maliyet olduğu açıktır. Ancak sağlanacak dönüşümün gerek maliyet gerek karbon salınımındaki gerçekler bilimsel yöntemlerle ortaya konulduğunda dönüşüm sürecinin daha hızlı ilerlediği bilinmektedir. Bu sebepten dolayı hazırlanılan bu çalışma ile Antalya İli içerisindeki kentsel hareketliliğin toplu taşıma sistemindeki dönüşümü ile sürdürülebilir kentsel hareketliliğinin sağlanması ve karbon salınımının azaltılması sürecindeki fayda ve maliyet analizi ortaya koyularak yapılacak dönüşümün gerçekleşebilme olasılığının ortaya koyulması amaçlanmaktadır. Bu tez çalışmasında amaç, Antalya ili toplu taşıma sisteminde aktif olarak bulunan dizel-LPG otobüslerin, düşük karbon salımlı otobüslere dönüştürülmesinde, fayda ve maliyet analizi ile hem ekonomik olması hem de sürdürülebilir kentsel hareketliliğin, daha temiz ve entegre olması için en uygun olanı belirlemektir. Fayda maliyet analizi çeşitli yatırım alternatifleri arasında ekonomik açıdan getirisi en yüksek olanı tespit edebilmek için, yatırımların gerektirdiği tüm maliyetlerin ve sağlayacakları tüm faydaların parasal değerlerle ifade edilip sistematik olarak karşılaştırılması ve aralarından en optimal olanın tercih edilmesi olarak tanımlanabilir (Demirkol, 2019).

1.2. Araştırma Soruları

Günümüzde artan kentleşme oranları ve yoğun göç hareketleri, şehirlerin altyapı kapasitelerini zorlamakta ve çevresel sürdürülebilirlik üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır. Özellikle Antalya gibi yoğun turizm faaliyetleri ile bilinen bölgelerde, şehir içi ulaşım sistemleri bu baskıyı doğrudan deneyimleyen kritik bir alan haline gelmiştir. Kentlerin sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, çevre dostu ve düşük karbon salınımlı ulaşım sistemlerine geçişin sağlanması, iklim değışikliği ile mücadelede önemli bir araç olarak kabul edilmektedir.

Antalya’da kentsel hareketlilik, hem bireylerin yaşam kalitesini doğrudan etkileyen bir unsur hem de karbon emisyonlarının en büyük kaynaklarından biri olarak ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, dizel ve LPG gibi fosil yakıtlarla çalışan toplu taşıma araçlarının, elektrikli araçlarla değıştirilmesi gerekliliği kritik bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak bu dönüşüm süreci, sadece teknik değil, aynı zamanda ekonomik, sosyal ve politik engellerin de olduğu çok katmanlı bir problem alanıdır.

Araştırma probleminin temelini, bu dönüşüm sürecinin hem ekonomik maliyetlerini hem de topluma sağlayacağı faydaları anlamaya yönelik bir fayda-maliyet analizi oluşturmaktadır. Elektrikli otobüslerin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, dönüşüm süreçlerinde yerel yönetimlerin ve kamu kaynaklarının sınırlı bütçeleriyle birleşerek önemli bir bariyer yaratmaktadır. Buna karşın, bu tür dönüşümlerin uzun vadeli çevresel faydaları ve ekonomik getirileri üzerine yapılan yeterli bir analiz, karar alma süreçlerini olumlu yönde etkileyebilecek bir araç olabilir. Öte yandan, Antalya gibi hızlı kentleşen ve yoğun nüfuslu bir şehirde, toplu taşıma sistemlerinin dönüşümüne dair yapılacak çalışmalarda, teknolojik altyapının uygunluğu, toplumun adaptasyon seviyesi ve kamu politikalarının destekleyici rolü gibi unsurlar dikkate alınmalıdır. Bu unsurlar, araştırma problemini daha da karmaşık hale getirmekte ve farklı disiplinlerin katkılarını zorunlu kılmaktadır.

Araştırma, şehir içi ulaşım sistemlerinde sürdürülebilirliğin sağlanması için gerekli dönüşüm süreçlerinin tüm boyutlarını ele almayı hedeflemektedir. Örneğin, elektrikli otobüslerin uygulanabilirliğini artıran teknolojik yenilikler, enerji verimliliği ile ilgili stratejiler ve bu araçların karbon salınımı üzerindeki etkileri detaylı olarak

incelenmelidir. Ayrıca, bu dönüşümün yerel halkın yaşam kalitesine etkileri, ekonomik sürdürülebilirlik bağlamındaki yeri ve politika yapıcılar üzerindeki etkisi de araştırmanın kapsamına dahil edilmelidir. Burada hareketle Bu araştırma, sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında Antalya ili toplu taşıma sisteminde düşük karbonlu teknolojilere geçişin ekonomik, çevresel ve sosyal etkilerini anlamayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda temel araştırma sorusu şu şekilde formüle edilmiştir: “Antalya ili toplu taşıma sisteminde fosil yakıtla çalışan araçların düşük karbon salınlı alternatiflere dönüştürülmesi, kentsel hareketliliğin sürdürülebilirliği, karbon emisyonlarının azaltılması ve ekonomik uygulanabilirlik açısından nasıl bir etki yaratır?”

1.3. Araştırma Hipotezleri

Bu araştırma kapsamında geliştirilen hipotezler, sürdürülebilir kentsel hareketlilik literatürü ve düşük karbonlu teknolojilerin kentsel ulaşım sistemlerindeki uygulamalarına ilişkin mevcut bilgi birikimi üzerine temellendirilmiştir. Antalya ili toplu taşıma sisteminde fosil yakıtlı araçlardan elektrikli araçlara geçişin çok boyutlu etkilerini test etmek amacıyla oluşturulan bu hipotezler, çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik uygulanabilirlik ve sosyal kabul edilebilirlik açılarından araştırma problemine sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Bu hipotezlerin doğrulanması veya reddedilmesi, Antalya özelinde sürdürülebilir kentsel hareketlilik politikalarının geliştirilmesine katkı sağlayacak önemli bulgulara ulaşılmasını mümkün kılacaktır.

H₁: Antalya ili toplu taşıma sisteminde dizel ve LPG’li otobüslerin elektrikli araçlarla değiştirilmesi, karbon salınımını önemli ölçüde azaltacaktır.

H₂: Elektrikli otobüslerin uzun vadeli işletme maliyetleri, fosil yakıtlı araçlara göre daha düşük olacak ve ekonomik sürdürülebilirliği artıracaktır.

H₃: Elektrikli toplu taşıma araçlarının kullanımı, Antalya’da yaşayan halkın ulaşım deneyimini iyileştirecek ve kent içi hava kalitesinde belirgin bir artışa neden olacaktır.

H₄: Elektrikli otobüslere geçiş için gerekli altyapı yatırımları, uzun vadeli ekonomik faydalar göz önünde bulundurulduğunda finansal olarak uygulanabilir düzeydedir.

H₅: Elektrikli otobüslerin enerji verimliliği, Antalya ili kent içi ulaşımında fosil yakıtlı araçlara göre daha yüksek olacaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Sürdürülebilir kentsel hareketlilik, kentlerin hem çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini hem de ekonomik ve sosyal ihtiyaçlarını karşılamayı amaçlayan bir ulaşım sisteminin oluşturulması olarak tanımlanmaktadır (Korkmazıürek ve Polat, 2019). Bu kavram, geleneksel ulaşım yaklaşımlarından farklı olarak yalnızca bireylerin fiziksel hareketliliğini değil, aynı zamanda çevreye olan etkilerini, toplumsal eşitliği ve ekonomik uygulanabilirliği dikkate alan çok boyutlu bir yapıyı ifade etmektedir. Günümüzde şehirleşmenin hızla artması, ulaşım sistemlerinin kentsel yaşam üzerindeki etkilerini daha belirgin hale getirmiştir. Bu bağlamda, sürdürülebilir kentsel hareketlilik, iklim değişikliğiyle mücadele, enerji verimliliği, kaynak yönetimi ve toplumsal refah gibi kritik alanlarda önemli bir çözüm sunmaktadır (Örselli ve Dinçer, 2019).

Kentsel hareketliliğin sürdürülebilirliği, çeşitli çevresel, ekonomik ve sosyal faktörlerin bir araya geldiği bir dengeyi gerektirmektedir. Çevresel açıdan, ulaşım sistemlerinin karbon salınımını azaltması, doğal kaynakları verimli kullanması ve biyolojik çeşitliliği koruması beklenmektedir. Ekonomik olarak, sürdürülebilir hareketlilik, enerji tüketimini azaltarak maliyetleri düşürmekte, toplu taşıma sistemlerinin etkinliğini artırarak ekonomik büyümeye katkıda bulunmaktadır. Sosyal boyutta ise, herkesin eşit bir şekilde ulaşım imkanlarına erişimini sağlamayı hedeflemektedir. Özellikle düşük gelirli kesimlerin toplu taşıma hizmetlerine erişiminin artırılması, sürdürülebilir kentsel hareketliliğin temel amaçlarından biridir (Yazar, 2006).

2.1. Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik: Kavramsal Çerçeve

Kavramın tarihsel arka planına bakıldığında, sürdürülebilir kentsel hareketlilik fikrinin 20. yüzyılın ikinci yarısında çevresel farkındalığın artmasıyla ön plana çıktığı görülmektedir. 1992 yılında düzenlenen Rio Çevre ve Kalkınma Konferansı ve sonrasında imzalanan Kyoto Protokolü gibi uluslararası anlaşmalar, ulaşımın çevresel etkilerini azaltmayı amaçlayan politikaların temelini oluşturmuştur. Bu bağlamda, Avrupa Birliği'nin 2011 yılında yayınladığı "Beyaz Kitap" adlı ulaşım stratejisi, 2050

yılına kadar karbon salınımını sıfıra indirmeyi hedefleyen somut bir çerçeve sunmaktadır (Pınarcıoğlu ve Kanbak, 2020).

Sürdürülebilir kentsel hareketlilik kavramı, aynı zamanda teknolojik yeniliklerle de doğrudan ilişkilidir. Elektrikli ve hibrit araç teknolojilerinin geliştirilmesi, akıllı ulaşım sistemlerinin entegrasyonu ve yenilenebilir enerji kaynaklarının ulaşım altyapısında kullanılması, bu kavramın hayata geçirilmesinde kritik rol oynamaktadır. Özellikle elektrikli araçların yaygınlaşması, fosil yakıt bağımlılığını azaltarak kentsel hareketliliğin çevresel etkilerini minimize etmektedir. Bunun yanı sıra, akıllı ulaşım sistemleri, trafik yoğunluğunu azaltarak yakıt tüketimini düşürmekte ve zaman tasarrufu sağlamaktadır (Örselli ve Dinçer, 2019). Sürdürülebilir kentsel hareketlilik, yalnızca teknik bir dönüşüm değil, aynı zamanda sosyal bir dönüşüm sürecini de ifade etmektedir. Bu süreçte, bireylerin toplu taşıma kullanım alışkanlıklarının değiştirilmesi, yaya ve bisiklet yollarının artırılması ve kent sakinlerinin çevresel farkındalıklarının geliştirilmesi gereklidir. Örneğin, bisiklet paylaşım sistemleri ve yaya dostu şehir planlama yaklaşımları, hareketliliği artırırken karbon salınımını azaltan etkili stratejiler olarak öne çıkmaktadır (Yeniçeri, 2017). Sürdürülebilir kentsel hareketlilik, şehirlerin ulaşım altyapılarının çevresel, ekonomik ve toplumsal gereklilikleri aynı anda karşılamaya yönelik olarak yeniden yapılandırılmasını ifade etmektedir. Kentlerin hızla büyüyen nüfusu, ulaşımın hem kentsel yaşam kalitesini belirleyen bir faktör hem de çevresel sorunların kaynağı olarak daha büyük bir önem kazanmasına neden olmuştur. Bu bağlamda, sürdürülebilirlik ilkeleri çerçevesinde hareketlilik çözümleri üretmek, yalnızca ulaşımı kolaylaştırmak değil, aynı zamanda kaynakların verimli kullanılmasını, karbon salınımının düşürülmesini ve kent sakinlerinin yaşam kalitesinin artırılmasını hedeflemektedir (İçli, 2017).

Kentsel hareketlilik kavramının sürdürülebilirlik boyutu yalnızca çevresel etkilerle sınırlı kalmaz. Sosyal sürdürülebilirlik açısından, hareketlilik sistemlerinin her gelir grubundan bireyin erişimine açık olması, toplumsal eşitliği sağlamada kritik bir role sahiptir. Toplu taşıma sistemlerinin daha etkin kullanılması ve düşük maliyetli ulaşım seçeneklerinin teşvik edilmesi, bu eşitliğin sağlanmasında önemli adımlardır (Erdir, 2013). Öte yandan, ekonomik sürdürülebilirlik bağlamında, enerji verimliliğini artıran ve uzun vadede maliyetleri düşüren ulaşım altyapıları geliştirilmesi gereklidir. Sürdürülebilir kentsel hareketlilik, kentlerin büyüme hızına ayak uyduracak şekilde

evrilmek zorundadır. Şehirlerin nüfus artışıyla birlikte artan ulaşım taleplerini karşılamak, mevcut altyapıların yenilenmesini ve sürdürülebilir çözümlerle entegre edilmesini gerektirmektedir. Bu süreçte, yerel yönetimlerin rolü oldukça önemlidir. Çevre dostu politikaların geliştirilmesi, düşük karbon salınımlı teknolojilere geçiş için teşviklerin artırılması ve kent sakinlerinin bilinçlendirilmesi, sürdürülebilir hareketliliğin başarılı bir şekilde uygulanmasında belirleyici faktörlerdir (Örselli ve Akbay, 2019). Sürdürülebilir kentsel hareketlilik, aynı zamanda şehir planlaması ve mimarlıkla da güçlü bir ilişkiye sahiptir. Yaya dostu alanların artırılması, bisiklet yollarının yaygınlaştırılması ve toplu taşıma sistemlerinin entegrasyonu, kentlerin hem fiziksel hem de sosyal yapısını dönüştüren uygulamalar olarak ön plana çıkmaktadır. Bu tür yaklaşımlar, kent sakinlerinin bireysel araç kullanımına olan bağımlılığını azaltırken, aynı zamanda yaşam kalitesini artıran bir çevresel dönüşüm sağlamaktadır (İçli, 2017).

2.1.1. Sürdürülebilir kentsel hareketlilik tanımı, boyutu ve kriterleri

Sürdürülebilirlik kriterleri, kentsel hareketlilik sistemlerinin çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarda dengeli ve uzun vadeli bir gelişim sağlayabilmesi için belirlenen temel ilkeleri ifade etmektedir. Bu kriterler, bir ulaşım sisteminin sadece anlık ihtiyaçları karşılamasını değil, aynı zamanda gelecek nesillerin de yaşam kalitesini garanti altına alacak şekilde planlanmasını sağlamaktadır. Bu bağlamda sürdürülebilirlik kriterleri, çevreye duyarlılık, ekonomik uygulanabilirlik ve toplumsal eşitlik gibi temel unsurlara dayalıdır ve bu unsurların her biri birbiriyle etkileşim halindedir. Kriterlerin tanımlanması, uygulanması ve sonuçlarının izlenmesi, şehirlerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynamaktadır (Işıldaklı, 2022).

Çevresel sürdürülebilirlik, hareketliliğin karbon salınımını azaltarak doğal kaynakların korunmasını hedeflemektedir. Bu bağlamda, düşük karbon salınımlı araç teknolojilerinin teşvik edilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının ulaşım sistemlerinde entegrasyonu ve enerji verimliliğini artıran yöntemlerin uygulanması öne çıkmaktadır. Özellikle fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması, kentsel hareketlilik sistemlerinde çevresel sürdürülebilirlik kriterlerinin en önemli bileşenlerinden biridir. Elektrikli araçların yaygınlaştırılması, yaya dostu şehir

planlama stratejileri ve bisiklet yollarının artırılması gibi uygulamalar, bu hedeflere ulaşmada etkili araçlardır (Öztopcu ve Salman, 2019). Ayrıca, şehir içi ulaşımında kullanılan altyapıların doğaya olan etkisi de sürdürülebilirlik kriterleri kapsamında değerlendirilmelidir. Örneğin, asfalt yollar yerine su geçirgen malzemelerin kullanılması, yer altı su kaynaklarının korunmasına katkıda bulunabilir. Ekonomik sürdürülebilirlik kriterleri, ulaşım sistemlerinin maliyet-etkinliğini ve uzun vadede ekonomik büyümeye katkısını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Ulaşım yatırımlarının ilk maliyetleri genellikle yüksek olmakla birlikte, bu yatırımların enerji tasarrufu, zaman kazancı ve hava kirliliğinin azaltılması gibi faydalar sağlayarak ekonomik açıdan geri dönüşü yüksek olmalıdır. Fayda-maliyet analizleri, ekonomik sürdürülebilirlik kriterlerinin değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir (Koç, 2019). Örneğin, bir toplu taşıma sistemine yapılan yatırım, yalnızca maliyetler açısından değil, aynı zamanda bu sistemin sağladığı sosyal ve çevresel faydalar açısından da değerlendirilmelidir. Elektrikli otobüslerin uzun vadede fosil yakıtlı otobüslere kıyasla daha düşük işletme maliyetleri sunması, ekonomik sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. Toplumsal sürdürülebilirlik, herkesin eşit şekilde ulaşım hizmetlerinden faydalanmasını sağlamayı amaçlayan kriterleri içermektedir. Toplu taşıma sistemleri, düşük gelirli gruplar için erişilebilir ve uygun maliyetli olmalı, aynı zamanda yaşlılar ve engelli bireyler gibi özel grupların ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu bağlamda, toplumsal sürdürülebilirlik kriterleri, yalnızca fiziksel erişimi değil, aynı zamanda sosyal kabulü ve kullanım kolaylığını da kapsamaktadır. Şehirlerin planlanmasında, farklı grupların ihtiyaçlarının göz önünde bulundurulması, toplumsal eşitliği sağlama yolunda atılmış önemli bir adım olacaktır. Örneğin, engelli bireylerin kullanabileceği rampa ve asansörlerin toplu taşıma sistemlerine entegre edilmesi, toplumsal sürdürülebilirliğin somut bir göstergesidir (Ayaz, 2023).

Sürdürülebilirlik kriterlerinin uygulanmasında teknolojik yeniliklerin rolü büyüktür. Akıllı ulaşım sistemleri, hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik kriterlerini destekleyecek şekilde trafik yoğunluğunu azaltmak, enerji verimliliğini artırmak ve zaman kazancı sağlamak için kullanılabilir. Örneğin, GPS tabanlı araç izleme sistemleri ve akıllı trafik ışıkları, hem bireylerin seyahat sürelerini azaltabilir hem de yakıt tüketimini optimize ederek çevresel etkileri en aza indirebilir (Altuntaş, vd., 2020). Bunun yanı sıra, yenilikçi enerji depolama çözümleri ve elektrikli araç şarj

altyapılarının geliştirilmesi, bu kriterlerin uygulanabilirliğini artıracaktır. Politik sürdürülebilirlik kriterleri, ulaşım sistemlerinin uzun vadede sürdürülebilirliğini sağlamak için gerekli olan düzenleyici ve teşvik edici politikaların geliştirilmesini içermektedir. Yerel ve ulusal yönetimler, sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedeflerini desteklemek için gerekli finansal teşvikleri, vergi indirimlerini ve düzenlemeleri sağlamalıdır. Özellikle düşük karbonlu teknolojilere geçişin teşvik edilmesi, sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin yaygınlaşmasında kritik bir rol oynamaktadır (Kuter ve Ünal, 2009). Bu kapsamda, hükümetlerin ve yerel yönetimlerin çevre dostu ulaşım politikalarını teşvik etmesi, toplu taşıma sistemlerini desteklemesi ve halkı bilinçlendirmesi gerekmektedir.

Sürdürülebilirlik kriterleri, modern kentsel yaşamın ihtiyaçlarına cevap veren ulaşım çözümlerinin geliştirilmesi için temel bir rehber sunmaktadır. Bu kriterler, kentlerin yalnızca günümüz taleplerini karşılamasını değil, aynı zamanda gelecekteki nesillerin de ihtiyaçlarını göz önünde bulundurmasını sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. Bir ulaşım sisteminin sürdürülebilir olması, sistemin üç temel boyutta – çevresel, ekonomik ve toplumsal – denge sağlaması gerektiği anlamına gelmektedir (Bağdatlı, 2016). Bu kriterlerin başarılı bir şekilde uygulanması, yalnızca teknik çözümlerle değil, aynı zamanda güçlü bir politika çerçevesi ve toplumun aktif katılımıyla mümkündür. Sürdürülebilirlik kriterlerinin uygulanmasında, inovasyonun ve teknolojinin rolü büyüktür. Akıllı şehir teknolojileri, sürdürülebilir kentsel hareketliliği desteklemek için çok çeşitli çözümler sunmaktadır. Akıllı trafik yönetim sistemleri, trafik akışını optimize ederek yakıt tüketimini ve emisyonları azaltabilir. Benzer şekilde, gerçek zamanlı toplu taşıma bilgisi sağlayan mobil uygulamalar, bireylerin daha verimli seyahat etmelerine olanak tanımaktadır (Meşhur, 2019). Yenilikçi çözümler yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kullanıcı deneyimini geliştirerek toplu taşıma sistemlerinin benimsenmesini teşvik etmektedir. Sürdürülebilirlik kriterlerinin başarılı bir şekilde uygulanması, politika ve düzenlemelerin etkili bir şekilde hayata geçirilmesine de bağlıdır.

2.1.2. Uluslararası uygulamalar ve politikalar

Sürdürülebilir kentsel hareketlilik kavramının küresel ölçekte uygulanabilir hale gelmesi, ülkelerin ve uluslararası kuruluşların geliştirdiği politikalar ve uygulamalar sayesinde mümkün olmuştur. Dünyanın farklı bölgelerinde, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için uygulanmış olan çeşitli politika ve projeler, bu alandaki en iyi uygulama örneklerini oluştururken, aynı zamanda küresel bir dayanışma ve bilgi paylaşımı ortamı yaratmıştır (Sarıçoban, 2011). Bu çerçevede, uluslararası düzeydeki uygulamalar ve politikalar, şehirlerin ulaşım sistemlerini çevresel, ekonomik ve toplumsal sürdürülebilirlik ilkelerine uygun bir şekilde yeniden tasarlama ve tasarlamalarını sağlayan önemli bir rehber işlevi görmektedir. Birçok uluslararası kuruluş, sürdürülebilir kentsel hareketliliği teşvik eden politika çerçeveleri ve rehberler geliştirmiştir. Özellikle Birleşmiş Milletler (BM), 2015 yılında kabul edilen Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile bu konuda önemli bir küresel hedef belirlemiştir. SKA'nın 11. maddesi, sürdürülebilir şehirler ve topluluklar oluşturmayı hedeflerken, güvenli, erişilebilir ve çevre dostu ulaşım sistemlerinin geliştirilmesini öncelikli bir konu olarak ele almıştır. Bu bağlamda, BM'nin himayesinde yürütülen Habitat programı, kentsel hareketlilikte sürdürülebilirlik kriterlerinin yaygınlaştırılmasına yönelik bir dizi girişim sunmaktadır (Köse, 2023). Program kapsamında, özellikle gelişmekte olan ülkelerde düşük karbonlu toplu taşıma sistemlerinin uygulanmasına yönelik projeler hayata geçirilmiştir.

Avrupa Birliği (AB), sürdürülebilir kentsel hareketlilik politikalarının oluşturulmasında ve uygulanmasında lider bir rol üstlenmiştir. AB'nin 2011 yılında yayımladığı "Beyaz Kitap: Ulaşım Rekabetçi ve Sürdürülebilir Bir Gelecek için Yol Haritası" adlı strateji belgesi, 2050 yılına kadar Avrupa'nın ulaştırma sektöründeki karbon salınımını %60 oranında azaltmayı hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda, AB üyesi ülkeler, düşük karbonlu araç teknolojilerinin teşvik edilmesi, toplu taşıma altyapılarının geliştirilmesi ve yaya ve bisiklet yollarının artırılması gibi çeşitli politikalar benimsemiştir (İncekara, 2019). Ayrıca, Avrupa şehirlerinde uygulanan "Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planları" (SUMP), yerel yönetimlerin sürdürülebilir ulaşım politikalarını kapsamlı bir şekilde entegre etmelerine yardımcı olmuştur. Bu planlar, toplu taşıma sistemlerinin iyileştirilmesi, şehir içi trafik yönetimi

ve çevre dostu ulaşım modlarının teşvik edilmesini içeren bir dizi stratejik hedef belirlemektedir (Ayaz, 2023).

Dünya Bankası ve Asya Kalkınma Bankası gibi uluslararası finans kuruluşları da, sürdürülebilir kentsel hareketlilik projelerine yönelik mali destek sağlayarak bu alandaki dönüşümü hızlandırmaktadır. Özellikle düşük gelirli ülkelerde, çevre dostu ulaşım projelerinin finansmanı, bu kuruluşların sağladığı hibeler ve krediler aracılığıyla mümkün hale gelmiştir. Örneğin, Dünya Bankası'nın 2020'de başlattığı "Yeşil Ulaşım Girişimi," fosil yakıt kullanımını azaltmayı ve elektrikli araç altyapısını yaygınlaştırmayı hedefleyen projeler için finansman sağlamaktadır. Bu tür girişimler, ülkelerin sürdürülebilir ulaşım sistemlerine geçiş sürecinde karşılaştıkları ekonomik engelleri azaltmak için kritik öneme sahiptir (Kuşat, 2013).

Asya'da sürdürülebilir kentsel hareketlilik politikaları, özellikle Çin ve Japonya gibi ülkelerde büyük bir ivme kazanmıştır. Çin, 2000'li yıllardan itibaren düşük karbonlu ulaşım teknolojilerinin geliştirilmesinde lider bir rol üstlenmiş ve dünya çapında en büyük elektrikli otobüs filosuna sahip olmuştur. Çin'in "Yeşil Ulaşım Programı," kentsel alanlarda bisiklet paylaşım sistemlerinin yaygınlaştırılmasını, toplu taşıma ağlarının genişletilmesini ve elektrikli araçların teşvik edilmesini içermektedir. Benzer şekilde, Japonya'da uygulanan "Eko-Ulaşım Programı," düşük karbon salınımlı tren sistemleri ve toplu taşıma entegrasyonuna odaklanmıştır. Japonya'nın demiryolu sistemleri, enerji verimliliği ve düşük çevresel etkileri ile dünya çapında bir model olarak kabul edilmektedir (İlhan ve Göktuğ, 2020).

Kuzey Amerika'da ise, sürdürülebilir kentsel hareketlilik politikaları, federal ve eyalet düzeyinde farklı yaklaşımlar içermektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD), "Akıllı Ulaşım Sistemleri" programı, sürdürülebilir ulaşımı desteklemek için dijital teknolojilerin kullanımını teşvik etmektedir. Özellikle büyük şehirlerde, toplu taşıma sistemleri, elektrikli araç şarj altyapısı ve yaya dostu şehir planlaması projeleri gibi girişimlere önemli yatırımlar yapılmıştır. Kanada ise, "Sürdürülebilir Ulaşım Stratejisi" kapsamında, toplu taşımaya yapılan yatırımları artırarak karbon salınımını azaltmayı hedeflemektedir. Kanada'nın şehirlerinde uygulanan bisiklet dostu politikalar ve toplu taşıma entegrasyon projeleri, sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedeflerine ulaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Tufan, 2014).

Latin Amerika, özellikle son yıllarda sürdürülebilir kentsel hareketlilik alanında önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Kolombiya'nın Medellin şehri, dünyanın ilk metrocafe sistemini hayata geçirerek toplu taşıma sistemlerini düşük gelirli bölgelerde yaşayan topluluklara erişilebilir hale getirmiştir. Brezilya'da ise Curitiba şehri, "Hızlı Otobüs Taşımacılığı Sistemi" (BRT) uygulamasıyla sürdürülebilir hareketlilik alanında öncü bir rol üstlenmiştir. Bu sistem, toplu taşımanın hızını ve verimliliğini artırırken, bireysel araç kullanımını azaltmayı başarmıştır (Töre ve Çağlayan, 2018).

Afrika'da, sürdürülebilir kentsel hareketlilik politikaları, genellikle altyapı yetersizliklerine rağmen önemli sonuçlar vermiştir. Güney Afrika'nın Johannesburg şehri, düşük karbonlu toplu taşıma sistemleri geliştirmeye yönelik projeler başlatmıştır. Rea Vaya adlı BRT sistemi, şehrin toplu taşıma altyapısını güçlendirmiş ve aynı zamanda çevresel etkileri en aza indirmiştir. Bununla birlikte, Kenya'nın başkenti Nairobi, bisiklet yollarının genişletilmesi ve toplu taşıma sistemlerinin modernizasyonu için çeşitli projeler geliştirmiştir (Altuntaş ve Eyigün, 2021).

Sürdürülebilir kentsel hareketlilik, dünya genelinde farklı bölgelerde ve ülkelerde uygulanan çeşitli politikalar ve projelerle zengin bir çerçeveye sahiptir. Bu uygulamalar, çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı amaçlayan yaklaşımların bir kombinasyonunu temsil etmektedir. Her bölgenin kendi dinamikleri ve ihtiyaçları doğrultusunda geliştirdiği politikalar, bu alandaki çeşitliliği ve yenilikçiliği ortaya koymaktadır. Uluslararası düzeyde, sürdürülebilir kentsel hareketlilik politikaları genellikle karbon emisyonlarını azaltmayı, enerji verimliliğini artırmayı ve toplu taşımanın etkinliğini iyileştirmeyi hedefleyen kapsamlı stratejiler olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.2. Düşük Karbonlu Toplu Taşıma Sistemleri ve Teknolojileri

Küresel iklim değişikliği ile mücadele çerçevesinde, ulaşım sektörü karbon emisyonlarının azaltılması konusunda kritik bir rol üstlenmektedir. Toplu taşıma sistemleri, kentsel hareketlilikte bireysel araç kullanımına alternatif sunarak hem emisyonların düşürülmesinde hem de enerji verimliliğinin artırılmasında önemli bir potansiyel barındırmaktadır. Geleneksel fosil yakıt temelli toplu taşıma araçlarından

düşük karbonlu teknolojilere geçiş, sürdürülebilir kentsel hareketliliğin temel taşlarından birini oluşturmaktadır. Elektrikli otobüsler, hibrit sistemler, hidrojen yakıt hücreli araçlar ve biyoyakıt kullanan taşıtlar gibi alternatif teknolojiler, farklı operasyonel koşullarda çeşitli avantajlar sunmakta ve kentsel ulaşım sistemlerinin dönüşümünde yeni olanaklar yaratmaktadır. Bu teknolojilerin performans karakteristikleri, maliyet yapıları ve çevresel etkileri, yerel yönetimlerin toplu taşıma filolarını modernize etme süreçlerinde dikkate alması gereken temel faktörler arasında yer almaktadır.

2.2.1. Elektrikli araç teknolojileri ve özellikleri

Düşük karbonlu toplu taşıma sistemleri, çağdaş şehirlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel fosil yakıtlı ulaşım sistemlerinin yol açtığı çevresel, ekonomik ve sosyal problemleri azaltmak amacıyla geliştirilen bu sistemler, şehirlerin karbon emisyonlarını düşürme, enerji verimliliğini artırma ve toplumsal eşitlik sağlama gibi hedeflere hizmet etmektedir. Özellikle elektrikli araç teknolojileri, bu dönüşümün en önemli bileşenlerinden biri olarak dikkat çekmektedir. Elektrikli araçlar, sadece bireysel ulaşımında değil, aynı zamanda toplu taşıma sistemlerinde de yaygınlaşarak kentlerin sürdürülebilir ulaşım altyapılarına entegre edilmektedir (Tonk ve Selçuk, 2020).

Elektrikli araç teknolojilerinin düşük karbonlu toplu taşıma sistemlerindeki rolü, birkaç temel avantaj üzerinden değerlendirilebilir. İlk olarak, bu araçların karbon salınımını büyük ölçüde azaltması, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri açısından kritik bir avantajdır. Elektrikli araçlar, fosil yakıt yerine yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalışabildiği için, karbon emisyonları neredeyse sıfıra indirilebilmektedir. Ayrıca, bu araçların enerji verimliliği, fosil yakıtlı araçlara kıyasla çok daha yüksektir. İçten yanmalı motorların enerji dönüşüm verimliliği genellikle %30-40 arasında değişirken, elektrikli motorlar %80'in üzerinde bir verimlilik sağlayabilmektedir (Fidan vd., 2022). Bu durum, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına olanak tanıyarak hem çevresel hem de ekonomik faydalar sunmaktadır.

Elektrikli araç teknolojilerinin bir diğer önemli özelliği, sessiz çalışmaları sayesinde gürültü kirliliğini azaltmasıdır. Şehirlerin yoğun nüfuslu bölgelerinde gürültü kirliliği,

hem fiziksel hem de zihinsel sağığı olumsuz etkileyen ciddi bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrikli araçların bu sorunu büyük ölçüde ortadan kaldırması, şehir yaşam kalitesini artıran bir diğer etkidir. Ayrıca, bu araçların daha az hareketli parça içermesi, bakım maliyetlerini ve arıza oranlarını düşürerek toplu taşıma işletmeciliğı açısından ekonomik bir avantaj sağlamaktadır (Güner, 2013).

Elektrikli araçların toplu taşıma sistemlerindeki uygulamaları, genellikle elektrikli otobüsler, tramvaylar, metrolar ve elektrikli trenler gibi araçlar üzerinden gerçekleştirilmektedir. Özellikle elektrikli otobüsler, şehir içi toplu taşıma sistemlerinde esneklik ve erişilebilirlik sağlamaları nedeniyle büyük bir ilgi görmektedir. Bu araçlar, dizel otobüslere kıyasla çok daha düşük işletme maliyetleri sunarken, aynı zamanda karbon emisyonlarını da önemli ölçüde azaltmaktadır. Örneğın, Çin'in Shenzhen şehri, tamamen elektrikli bir otobüs filosuna geçiş yaparak dünya çapında bu alandaki en başarılı örneklerden biri olmuştur. Shenzhen' de kullanılan elektrikli otobüsler, yılda binlerce ton karbon emisyonunun önlenmesini sağlamış ve şehir sakinlerinin hava kalitesini önemli ölçüde artırmıştır (Çıtak, 2014).

Elektrikli araç teknolojilerinin başarısı, büyük ölçüde şarj altyapısının geliştirilmesine bağlıdır. Elektrikli araçların etkin bir şekilde çalışabilmesi için, şehir genelinde yeterli sayıda şarj istasyonunun kurulması gereklidir. Bu istasyonlar, genellikle hızlı şarj ve normal şarj seçenekleri sunarak farklı ihtiyaçlara hitap etmektedir. Hızlı şarj istasyonları, toplu taşıma araçlarının kısa sürede yeniden şarj edilmesini sağlayarak operasyonel verimliliğı artırmaktadır. Bununla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının bu şarj istasyonlarına entegre edilmesi, elektrikli araçların karbon nötr bir çözüm haline gelmesini desteklemektedir. Örneğın, güneş panelleri ve rüzgâr türbinleriyle desteklenen şarj altyapıları, hem enerji maliyetlerini azaltmakta hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır. Elektrikli araç teknolojileri, enerji depolama çözümleri açısından da önemli yenilikler sunmaktadır. Lityum-iyon bataryalar, bu araçların enerji depolama kapasitesini artırırken, aynı zamanda araç menzilini de genişletmektedir. Gelişen batarya teknolojileri sayesinde, elektrikli araçların şarj süreleri kısalmakta ve menzil kapasiteleri giderek artmaktadır. Bu durum, toplu taşıma sistemlerinde elektrikli araçların kullanımını daha da cazip hale getirmektedir. Örneğın, yeni nesil elektrikli otobüsler, tek bir şarjla 400 kilometreden

fazla yol alabilmekte, bu da şehir içi toplu taşıma operasyonları için yeterli bir menzil sunmaktadır (Aybirdi, 2021).

Elektrikli araç teknolojilerinin düşük karbonlu toplu taşıma sistemlerinde ön plana çıkmasının en önemli nedenlerinden biri, karbon emisyonlarını sıfıra yakın düzeye indirme potansiyelidir. Geleneksel içten yanmalı motorlar fosil yakıt kullanımına dayandığı için yüksek miktarda karbon salınımına neden olurken, elektrikli araçlar bu etkileri büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrikle çalışan araçlar, çevresel etkileri minimize ederek toplu taşıma sistemlerinin ekolojik sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda, şehirlerin karbon nötr hedeflerine ulaşmasında elektrikli toplu taşıma araçlarının önemi büyüktür. Elektrikli araçların benimsenmesinde hükümetlerin ve yerel yönetimlerin uyguladığı teşvik politikaları da önemli bir rol oynamaktadır (Karlı, 2023). Elektrikli araç alımlarında sunulan vergi indirimleri, düşük faizli krediler ve sübvansiyonlar, bu araçların toplu taşıma filolarında daha hızlı yaygınlaşmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, fosil yakıtlı araçların kullanımını sınırlayan yasal düzenlemeler, bireylerin ve kurumların elektrikli alternatiflere yönelmesine katkıda bulunmaktadır. Örneğin, birçok Avrupa şehri, belirli bölgelerde dizel ve benzinli araçların kullanımını yasaklayarak düşük karbonlu toplu taşıma sistemlerine geçişi hızlandırmıştır (Nalbant, 2019).

Sonuç olarak, düşük karbonlu toplu taşıma sistemleri ve elektrikli araç teknolojileri, şehirlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında temel bir role sahiptir. Bu teknolojiler, çevresel etkilerin azaltılması, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması ve ekonomik maliyetlerin düşürülmesi gibi avantajlar sunmaktadır. Elektrikli araçların toplu taşıma sistemlerine entegrasyonu, modern şehirlerin ulaşım altyapılarında köklü bir dönüşüm yaratacak, aynı zamanda gelecekte daha yaşanabilir bir kentsel yaşamın temelini atacaktır (Ersoy, 2019).

2.2.2. Fosil yakıtlı ve alternatif yakıtlı taşıtların karşılaştırması

Ulaşım sistemlerinde fosil yakıtlı taşıtlar ile alternatif yakıtlı taşıtlar arasındaki karşılaştırma, modern şehirlerin çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda önem kazanan bir analiz alanıdır. Bu karşılaştırma, enerji tüketimi, çevresel etkiler,

maliyet unsurları, teknolojik uygunluk ve toplumsal kabul gibi çok boyutlu bir çerçevede ele alınmalıdır. Geleneksel olarak, fosil yakıtlı taşıtlar, enerji yoğunluğu ve kolay erişilebilirliği nedeniyle şehir içi ve şehirlerarası ulaşım sistemlerinde baskın bir rol oynamış olsa da, alternatif yakıtlı taşıtların sunduğu çevresel ve ekonomik avantajlar, bu geleneksel sistemleri yeniden değerlendirme gerekliliğini doğurmuştur (Kaya, 2013).

Fosil yakıtlı taşıtlar, içten yanmalı motorlarla çalışmakta olup enerji kaynağı olarak petrol, dizel veya doğal gaz gibi fosil yakıtları kullanmaktadır. Bu taşıtların en belirgin avantajı, halihazırda küresel ölçekte geniş bir altyapı ağına sahip olmalarıdır. Yakıt ikmali, birçok şehirde yaygın olarak erişilebilen akaryakıt istasyonları aracılığıyla kolaylıkla gerçekleştirilebilmekte, bu da kullanıcılar için pratiklik ve erişilebilirlik sağlamaktadır. Bununla birlikte, fosil yakıtlı taşıtların önemli bir dezavantajı, yüksek karbon emisyonları üretmeleridir (Recepoğlu, 2021). Karbon dioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azot oksitler (NO_x) gibi sera gazları, fosil yakıtların yanmasıyla atmosfere salınmakta ve iklim değişikliğine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, bu taşıtlar, partikül madde ve sülfür dioksit (SO₂) gibi hava kirliliği unsurlarını da büyük ölçüde artırarak şehirlerdeki hava kalitesini düşürmektedir (Recepoğlu, 2021). Alternatif yakıtlı taşıtlar ise elektrik, hidrojen, biyodizel, biyogaz ve etanol gibi fosil yakıtlara alternatif enerji kaynaklarıyla çalışan taşıtları ifade etmektedir. Bu taşıtlar, enerji kaynağı seçimleri nedeniyle fosil yakıtlı taşıtlara kıyasla çevresel etkileri önemli ölçüde azaltabilir. Elektrikli taşıtlar, karbon emisyonlarını neredeyse sıfıra indirirken, hidrojenle çalışan taşıtlar, yalnızca su buharı salarak çevresel etkileri minimum düzeye çekmektedir. Biyodizel ve biyogaz gibi yenilenebilir enerji kaynakları ise, fosil yakıtlara kıyasla daha düşük karbon yoğunluğuna sahiptir ve organik atıklardan üretilebildikleri için döngüsel bir ekonomi modeline katkıda bulunurlar (Yılmaz, 2012).

Fosil yakıtlı taşıtlar ile alternatif yakıtlı taşıtların enerji verimliliği açısından karşılaştırılması, aralarındaki farkları daha iyi anlamak için önemli bir ölçüttür. Fosil yakıtlı taşıtlar, enerji dönüşüm verimliliği bakımından elektrikli taşıtlara kıyasla oldukça düşük bir performans sergilemektedir. İçten yanmalı motorlar, yakıtın yalnızca %30-40'ını hareket enerjisine dönüştürürken, elektrikli motorlar bu oranın %80-90 seviyelerine kadar çıkmasını sağlamaktadır. Bu fark, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlayarak toplam enerji talebini düşürmekte ve ekonomik

maliyetleri azaltmaktadır. Ayrıca, fosil yakıtların çıkarılması, taşınması ve rafine edilmesi süreçleri, elektrik üretimine kıyasla daha fazla enerji kaybına yol açmaktadır. Maliyet analizinde, fosil yakıtlı taşıtlar genellikle ilk satın alma maliyetleri açısından avantajlıdır (Demirkol, 2024). İçten yanmalı motorlara sahip taşıtların üretim maliyetleri, alternatif yakıtlı taşıtlarla kıyaslandığında daha düşüktür. Ancak, işletme maliyetleri dikkate alındığında, elektrikli ve hidrojen yakıtlı taşıtların uzun vadede daha ekonomik olduğu görülmektedir. Elektrikli taşıtlar, düşük enerji maliyetleri ve daha az bakım gereksinimi nedeniyle fosil yakıtlı taşıtlara göre daha düşük işletme maliyetlerine sahiptir. Bunun yanı sıra, hidrojen yakıt hücreli taşıtlar, şu anda yüksek üretim maliyetleri nedeniyle dezavantajlı gibi görünse de, teknolojinin yaygınlaşmasıyla birlikte maliyetlerin düşmesi beklenmektedir (Altunsoy, 2021).

Çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde, fosil yakıtlı taşıtların alternatif yakıtlı taşıtlara kıyasla açık bir dezavantaja sahip olduğu görülmektedir. Fosil yakıtların yanması, yalnızca karbon emisyonlarını artırmakla kalmaz, aynı zamanda asit yağmurlarına neden olan sülfür dioksit ve hava kalitesini düşüren partikül maddelerin salınımına yol açmaktadır. Alternatif yakıtlı taşıtlar ise, enerji kaynaklarının yenilenebilir olması ve emisyon seviyelerinin düşük olması nedeniyle çevresel sürdürülebilirliğe daha fazla katkıda bulunmaktadır. Özellikle elektrikli taşıtlar, şarj altyapılarının yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenmesi durumunda neredeyse tamamen karbon nötr hale gelmektedir (Erdir, 2013). Benzer şekilde, hidrojen yakıt hücreli taşıtlar, yalnızca su buharı salarak çevre üzerindeki olumsuz etkileri ortadan kaldırmaktadır. Toplumsal kabul ve kullanıcı davranışları açısından bakıldığında, fosil yakıtlı taşıtlar, mevcut altyapının yaygınlığı ve kullanıcı alışkanlıkları nedeniyle hala geniş bir kullanıcı kitlesine sahiptir. Bununla birlikte, alternatif yakıtlı taşıtların artan popülaritesi, çevresel farkındalığın yükselmesi ve hükümetlerin teşvik politikaları sayesinde giderek artmaktadır. Elektrikli araç teşvikleri, vergi indirimleri ve fosil yakıtlı taşıtların kullanımına getirilen kısıtlamalar, kullanıcıların alternatif yakıtlı taşıtlara geçişini hızlandırmaktadır. Özellikle Avrupa ülkelerinde, dizel ve benzinli taşıtların kullanımını yasaklayan düzenlemeler, elektrikli ve hidrojen yakıtlı taşıtların yaygınlaşmasına öncülük etmektedir (Özdemir, 2022).

Fosil yakıtlı taşıtlar ile alternatif yakıtlı taşıtların karşılaştırılması, günümüz ulaşım sistemlerinin çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşabilmesi

açısından son derece önemli bir konudur. Fosil yakıtlara dayalı ulaşım sistemleri, modern şehirlerdeki ulaşım altyapısının geleneksel omurgasını oluşturmuş olsa da, çevresel sorunlar ve enerji kaynaklarının sınırlılığı, alternatif yakıtlara olan ihtiyacı artırmıştır. Fosil yakıtlı taşıtlar, karbon yoğun enerji kaynaklarına dayandığı için yüksek seviyelerde sera gazı salınımına neden olmakta ve iklim değişikliğini hızlandırmaktadır. Buna karşılık, alternatif yakıtlı taşıtlar, karbon salınımını büyük ölçüde azaltan ve enerji kaynaklarının sürdürülebilirliğini artıran yenilikçi çözümler sunmaktadır (Cirit, 2014). Biyodizel ve biyogaz gibi biyolojik kaynaklardan elde edilen yakıtlarla çalışan taşıtlar, fosil yakıtların çevresel dezavantajlarını ortadan kaldırırken, enerji üretiminde döngüsel ekonomi prensiplerini uygulamaya koymaktadır. Bu yakıtların, organik atıklardan veya tarım ürünlerinden üretilmesi, hem atık yönetimi sorunlarını çözmekte hem de yerel ekonomilere katkıda bulunmaktadır. Örneğin, Avrupa’da birçok şehir, atık yağlardan biyodizel üretimini teşvik ederek, şehir içi toplu taşıma sistemlerinde bu yakıtları kullanan otobüs filoları oluşturmuştur (Çitak, 2014). Bu durum, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmanın yanı sıra, yerel düzeyde ekonomik katma değer yaratmıştır.

2.2.3. Hibrit ve tam elektrikli sistemlerin performans analizi

Düşük karbonlu taşıma sistemleri, sürdürülebilir şehircilik hedeflerine ulaşmada önemli bir araç olarak kabul edilmektedir. Bu sistemler, karbon emisyonlarını azaltma, enerji verimliliğini artırma ve çevre dostu ulaşımı teşvik etme açısından kentlerin yeniden şekillenmesine katkıda bulunmaktadır. Dünyanın farklı bölgelerinde uygulanan düşük karbonlu taşıma projeleri, hem çevresel etkileri azaltma hem de toplumsal faydalar sağlama açısından dikkate değer başarılar elde etmiştir. Bu örnekler, diğer şehirler ve ülkeler için model teşkil ederken, sürdürülebilir ulaşım politikalarının uygulanabilirliğini göstermesi açısından önemlidir (Arkun, 2020).

Düşük karbonlu taşıma sistemlerinin en dikkat çekici örneklerinden biri, Çin’in Shenzhen şehrinde hayata geçirilen elektrikli otobüs filosudur. Shenzhen, dünyadaki ilk tamamen elektrikli otobüs filosuna sahip şehir olarak, bu alandaki küresel liderlerden biri haline gelmiştir. Şehirde kullanılan yaklaşık 16.000 elektrikli otobüs, dizel otobüslere kıyasla yılda yüz binlerce ton karbon emisyonunu engellemiş ve şehirdeki hava kalitesini önemli ölçüde artırmıştır. Bu dönüşüm, yalnızca çevresel

etkilerle sınırlı kalmamış, aynı zamanda toplu taşıma kullanıcılarının konforunu ve yaşam kalitesini de artırmıştır. Elektrikli otobüslerin sessiz çalışma özellikleri, gürültü kirliliğini azaltmış, düşük işletme maliyetleri ise uzun vadede şehir bütçesine olumlu katkı sağlamıştır. Shenzhen örneği, yenilikçi politikalar ve büyük ölçekli yatırımların sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşmada ne kadar etkili olabileceğini açıkça ortaya koymaktadır (Özdemir, 2019).

Avrupa’da, Kopenhag, düşük karbonlu taşıma sistemlerinin başarısını sergileyen bir başka öncü şehir olarak öne çıkmaktadır. Kopenhag, bisiklet dostu şehir planlamasıyla uluslararası alanda tanınmaktadır. Şehir, bisiklet yollarını genişletmiş, bisiklet kullanımını teşvik eden altyapı projelerine büyük yatırımlar yapmış ve bu çabalar sayesinde şehir içi ulaşımın yaklaşık %40’ının bisikletlerle gerçekleştirildiği bir ulaşım modeli oluşturmuştur. Bisiklet kullanımının yaygınlaşması, hem karbon emisyonlarını hem de bireysel araç kullanımını azaltarak şehirdeki trafik yoğunluğunu büyük ölçüde hafifletmiştir. Ayrıca, bisiklet dostu politikalar, yerel halkın fiziksel sağlığını desteklemiş ve şehir sakinleri arasında çevre bilincinin artmasına katkıda bulunmuştur. Kopenhag, 2025 yılına kadar karbon nötr bir şehir olmayı hedefleyen planlarıyla, düşük karbonlu taşıma sistemlerinin entegre bir sürdürülebilirlik stratejisinin parçası olarak nasıl uygulanabileceğini göstermektedir (Aylan, 2021).

Güney Amerika’da ise Curitiba, düşük karbonlu taşıma sistemleri alanında uzun yıllardır bir model olarak kabul edilmektedir. Curitiba’nın Hızlı Otobüs Taşımacılığı Sistemi (BRT), toplu taşıma altyapısının verimliliğini artırmak ve bireysel araç kullanımını azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu sistem, toplu taşıma araçlarının özel yollar kullanarak trafikten bağımsız bir şekilde hareket etmesini sağlamış ve şehirdeki ulaşım sürelerini önemli ölçüde kısaltmıştır. Ayrıca, BRT sistemi, yakıt tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmuştur. Curitiba’nın başarısı, düşük maliyetli ve yüksek etkili ulaşım çözümlerinin, gelişmekte olan şehirlerde bile sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşılmasına nasıl yardımcı olabileceğini göstermektedir (Tanoğlu, 2014).

Latin Amerika’daki bir diğer başarılı örnek, Medellin şehrinin metroable sistemidir. Medellin, dağlık coğrafi yapısı nedeniyle toplu taşıma erişiminin zor olduğu bir şehir olarak, hava yolu taşımacılığını toplu taşıma sistemine entegre ederek yenilikçi bir

özüm geliştirmiştir. Metrocable sistemi, özellikle düşük gelirli mahallelerde yaşayan insanların şehir merkezine erişimini kolaylaştırmış, toplumsal eşitlik ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini bir araya getiren bir ulaşım modeli sunmuştur. Bu sistem, hem karbon salınımını azaltmış hem de sosyal anlamda daha adil bir ulaşım ağı oluşturmuştur. Medellin'in bu başarısı, ulaşım altyapısının coğrafi ve sosyo-ekonomik zorluklara uyum sağlamasında yenilikçi yaklaşımların önemini vurgulamaktadır (Ceylan, 2019).

Japonya'da, Tokyo metrosu, düşük karbonlu taşıma sistemlerinin başarısına dair etkileyici bir örnek sunmaktadır. Tokyo metrosu, enerji verimliliği yüksek sistemlerle çalışmakta ve yoğun nüfusa rağmen etkili bir toplu taşıma ağı sunmaktadır. Elektrikli trenlerin kullanımı, fosil yakıt tüketimini ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltırken, şehir içindeki ulaşımın hızlı, güvenli ve konforlu bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Tokyo metrosu, teknolojik yeniliklerin düşük karbonlu taşıma sistemlerine entegrasyonunun nasıl başarılı sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir (Tutan, 2016).

Amerika Birleşik Devletleri'nde, San Francisco'nun elektrikli toplu taşıma sistemleri de başarılı bir örnek olarak dikkat çekmektedir. şehirdeki tramvaylar ve elektrikli otobüsler, toplu taşıma sistemlerinin düşük karbonlu teknolojilerle yeniden yapılandırılmasına yönelik güçlü bir iradeyi temsil etmektedir. San Francisco'nun sürdürülebilir ulaşım stratejisi, yalnızca karbon emisyonlarını azaltmakla kalmamış, aynı zamanda yerel halkın sürdürülebilir ulaşım çözümlerine olan güvenini artırmıştır. Ayrıca, şehirde yürütölen yenilenebilir enerji projeleri, toplu taşıma sistemlerinin enerji ihtiyacının büyük bir kısmını temiz kaynaklardan karşılamaktadır (Kalpakçı, 2013).

Afrika kıtasında ise Güney Afrika'nın Johannesburg şehri, düşük karbonlu taşıma sistemlerinde kayda değer bir başarı elde etmiştir. Johannesburg'un Rea Vaya adlı BRT sistemi, şehirdeki toplu taşıma altyapısını geliştirmiş, yolcu taşımacılığını daha verimli hale getirmiş ve karbon salınımını azaltmıştır. Özellikle gelişmekte olan bölgelerde bu tür projeler, düşük maliyetli özömler sunarak hem çevresel hem de sosyal sürdürülebilirlik hedeflerine hizmet etmektedir. Bu başarı örnekleri, düşük karbonlu taşıma sistemlerinin farklı coğrafi, ekonomik ve sosyal koşullarda

uygulanabilir olduğunu göstermektedir (Şişman, 2015). Her bir örnek, yerel ihtiyaçlara uygun çözümler sunarak, şehirlerin sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşmasında yol gösterici bir rol oynamaktadır. Bu sistemlerin başarısı, güçlü politik irade, yenilikçi teknolojiler ve yerel halkın desteğiyle mümkün olmuştur. Gelecekte, bu örneklerin daha geniş bir ölçekte benimsenmesi, dünya genelinde daha çevre dostu, verimli ve eşitlikçi ulaşım sistemlerinin kurulmasına katkı sağlayacaktır.

2.3. Ekonomik Değerlendirme Yöntemleri

Fayda-maliyet analizi (FMA), büyük ölçekli projelerin ve yatırımların ekonomik, sosyal ve çevresel etkilerinin sistematik bir şekilde değerlendirilmesi için kullanılan bir karar destek yöntemidir. Bu analiz, kaynakların etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamak ve yatırımların getirisini optimize etmek amacıyla, belirli bir projenin toplam faydalarının toplam maliyetlerine oranını ölçerek uygulanmaktadır (Turan, 2007). Bu yöntem, özellikle kamu projelerinde, sınırlı kaynakların en verimli şekilde kullanılmasını sağlamak için kritik bir araç olarak kabul edilmektedir. Ulaşım projeleri gibi yüksek maliyetli ve uzun vadeli yatırımlarda, fayda-maliyet analizi yöntemi, karar alıcıların projelerin uygulanabilirliğini ve etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmelerine olanak tanımaktadır (İşler, 2018).

Fayda-maliyet analizi, yalnızca ekonomik çıktıları değil, aynı zamanda sosyal ve çevresel etkileri de içeren geniş bir çerçevede ele alınmaktadır. Bu yöntem, bir projenin sağlayacağı doğrudan ve dolaylı tüm faydaları tanımlamakta, bunları parasal birimlerle ifade eder ve ardından bunları proje maliyetleri ile karşılaştırmaktadır. Analiz, projelerin uygulanması durumunda sağlanacak olan toplumsal refah artışını, alternatif projelerle karşılaştırarak ölçmektedir. Bu nedenle, FMA, yalnızca bir yatırımın ekonomik getirilerini değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik, toplumsal eşitlik ve yaşam kalitesi üzerindeki etkilerini de dikkate alan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır (Sencar, 2007).

Fayda-maliyet analizi süreci, birkaç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, analiz yapılacak projenin kapsamı ve hedefleri net bir şekilde tanımlanmaktadır. Bu aşamada, projeye ilgili tüm paydaşların görüşleri dikkate alınmakta ve analiz için gerekli veri setleri belirlenmektedir. Daha sonra, projenin maliyet bileşenleri

detaylandırılmaktadır. Bu bileşenler, yatırım maliyetleri, işletme giderleri, bakım masrafları ve dolaylı maliyetler gibi unsurları içermektedir. Maliyetlerin kapsamlı bir şekilde belirlenmesi, analiz sonuçlarının doğruluğu açısından kritik bir öneme sahiptir (Bağdatlı, 2016). Aynı şekilde, projenin sağlayacağı faydalar da belirlenmektedir. Fayda unsurları arasında zaman tasarrufu, yakıt tüketimindeki azalma, çevresel iyileşmeler, sağlık üzerindeki olumlu etkiler ve toplumsal refah artışları gibi çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bu faydalar, genellikle parasal birimlerle ifade edilerek analizde kullanılabilir hale getirilmektedir (Güröl, 2019).

Fayda-maliyet analizi yöntemleri, genellikle net bugünkü değer (NBD), fayda-maliyet oranı (FMO) ve iç verim oranı (İVO) gibi finansal göstergeler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Net bugünkü değer yöntemi, bir projenin gelecekte sağlayacağı toplam faydaların, bugünkü maliyetlerle karşılaştırılmasını içermektedir. Fayda-maliyet oranı, projeden elde edilecek faydaların toplam maliyetlere bölünmesiyle hesaplanmakta ve bu oran 1'den büyükse projenin ekonomik olarak uygulanabilir olduğu kabul edilmektedir. İç verim oranı ise, projeden elde edilecek toplam gelirlerin, yatırım maliyetlerini karşıladığı minimum faiz oranını belirlemektedir. Bu göstergeler, projelerin ekonomik uygulanabilirliğini ölçmek için kullanılan temel araçlardır (Gülümser, 2022).

2.3.1. Fayda-maliyet analizi: teorik temeller

Ulaşım sistemlerinde fayda-maliyet analizi (FMA) uygulamaları, büyük ölçekli altyapı projelerinin ekonomik, çevresel ve sosyal etkilerini değerlendirmek için kullanılan kapsamlı bir yöntemdir. Özellikle şehir içi toplu taşıma sistemleri, otoyol projeleri, demiryolu hatları ve havalimanı yatırımları gibi yüksek maliyetli projelerde, bu analiz yöntemi karar alma süreçlerinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. FMA, bir ulaşım projesinin sağlayacağı doğrudan ve dolaylı faydaları, bu projenin gerektirdiği maliyetlerle karşılaştırarak, yatırımın uygulanabilirliği ve etkinliği hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Bu uygulamalar, sınırlı kamu kaynaklarının en verimli şekilde tahsis edilmesini sağlamaya yönelik bir araç olmasının yanı sıra, toplumsal faydaları maksimize etme amacını taşımaktadır (Öztaşçı vd., 2021). Ulaşım sistemlerinde FMA'nın en önemli bileşenlerinden biri, projeden sağlanacak faydaların kapsamlı bir şekilde tanımlanmasıdır. Bu faydalar, zaman tasarrufu, yakıt tüketimindeki azalma,

trafik sıkışıklığının azaltılması ve toplumsal erişim olanaklarının artırılması gibi unsurları içermektedir. Örneğin, bir toplu taşıma hattının açılması, şehirdeki bireylerin seyahat sürelerini kısaltarak, iş gücü verimliliğini artırabilir. Benzer şekilde, trafik yoğunluğunu azaltan bir otoyol projesi, araçların daha az yakıt tüketmesini sağlayarak ekonomik ve çevresel faydalar yaratmaktadır (İşler, 2018). FMA, bu tür faydaları ölçerek ve parasal birimlerle ifade ederek, projelerin genel etkisini nicel bir çerçevede değerlendirme imkanı sunmaktadır. Maliyet unsurları ise, inşaat, işletme, bakım ve çevresel etkiler gibi çeşitli kalemleri içermektedir. Örneğin, bir ulaşım projesinin maliyeti, yalnızca altyapı yatırımlarını değil, aynı zamanda bu altyapının uzun vadede sürdürülebilirliğini sağlamak için gereken bakım masraflarını da kapsamaktadır. Ayrıca, projelerin çevresel maliyetleri de dikkate alınmalıdır. Örneğin, bir otoyol projesi, doğal yaşam alanlarını tahrip edebilir veya hava kirliliğini artırabilir (Bağdatlı, 2016). Bu tür etkiler, çevresel değerlendirme yöntemleri ve modelleme araçları kullanılarak analiz edilebilir ve FMA'ya dahil edilebilmektedir. FMA, genellikle net bugünkü değer (NBD), fayda-maliyet oranı (FMO) ve iç verim oranı (İVO) gibi finansal göstergelere dayanarak gerçekleştirilmektedir. Bu göstergeler, projelerin ekonomik uygulanabilirliğini değerlendirmek için güçlü araçlar sunmaktadır. Net bugünkü değer yöntemi, bir ulaşım projesinin gelecekte sağlayacağı tüm faydaların, bugünkü maliyetlerle karşılaştırılmasını içermektedir. Eğer NBD pozitif ise, projenin ekonomik olarak uygulanabilir olduğu sonucuna varılmaktadır. Fayda-maliyet oranı, projeden elde edilecek toplam faydaların toplam maliyetlere bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Bu oran 1'den büyükse, projenin faydalarının maliyetlerini aştığı kabul edilmektedir. İç verim oranı ise, projeden elde edilecek toplam gelirlerin, yatırım maliyetlerini karşıladığı minimum faiz oranını belirlemekte ve bu oran, projenin ekonomik sürdürülebilirliği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Kuleyin, 2011).

Ulaşım projelerinde FMA'nın uygulanması, karar alma süreçlerinde objektifliği artırır. Örneğin, bir şehirdeki toplu taşıma altyapısının genişletilmesi veya modernize edilmesi, yüksek maliyetler gerektiren bir yatırım olabilir. Ancak, bu tür projeler, trafik sıkışıklığını azaltarak zaman ve yakıt tasarrufu sağlayabilir. Ayrıca, toplu taşıma sistemlerinin enerji verimliliğini artırması, uzun vadede çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu tür projelerde FMA, yalnızca ekonomik etkileri değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal faydaları da ölçerek, karar vericilerin daha kapsamlı bir perspektif geliştirmesine olanak tanımaktadır (Demirkol, 2019).

FMA'nın ulaşım sistemlerinde uygulanmasındaki en büyük zorluklardan biri, tüm faydaların ve maliyetlerin doğru bir şekilde ölçülmesidir. Özellikle çevresel etkiler ve sosyal faydalar gibi parasallaştırılması zor unsurların analize dahil edilmesi, yöntemin kapsamını genişletmekte ancak aynı zamanda karmaşıklığını arttırmaktadır. Örneğin, bir toplu taşıma projesinin hava kirliliğini azaltma potansiyeli, çevresel değerlendirme modelleriyle ölçülebilenken, bu etkilerin ekonomik değeri konusunda farklı varsayımlar yapılabilmektedir. Benzer şekilde, düşük gelirli bölgelerdeki bireylerin ekonomik fırsatlara erişimini artıran bir ulaşım projesi, toplumsal eşitlik açısından önemli faydalar sağlasa da, bu tür faydaların parasallaştırılması daha zordur (Murteza, 2010).

Başarılı bir FMA uygulaması, geniş bir veri setine ve doğru varsayımlara dayanmaktadır. Bu süreçte, verilerin doğruluğu ve analiz yöntemlerinin uygunluğu, sonuçların geçerliliğini doğrudan etkilemektedir. Örneğin, gelecekteki yakıt fiyatlarının öngörülmesi, bir otoyol projesinin fayda-maliyet oranını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Benzer şekilde, bir toplu taşıma hattının kullanıcı sayısındaki artışın doğru tahmin edilmesi, analiz sonuçlarının güvenilirliğini artırır (Yavuz, 2024). Bu nedenle, FMA, hassasiyet analizleriyle desteklenmeli ve sonuçların doğruluğunu test etmek için alternatif senaryolar incelenmelidir. FMA'nın ulaşım projelerindeki bir diğer önemli boyutu, alternatif projelerin karşılaştırılmasıdır. Örneğin, bir şehirde yeni bir toplu taşıma hattının inşası ile mevcut yolların genişletilmesi arasında bir seçim yapılması gerektiğinde, FMA, her iki seçeneğin maliyetlerini ve faydalarını karşılaştırarak, en yüksek toplumsal getiriyi sağlayacak projeyi belirlemeye yardımcı olmaktadır. Bu tür karşılaştırmalar, kamu kaynaklarının en verimli şekilde kullanılmasını sağlamanın yanı sıra, projelerin toplumsal kabulünü artırabilir (Yücel, 2019).

Fayda-maliyet analizi, özellikle ulaşım projelerinde, yatırımların ekonomik, çevresel ve toplumsal etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için kullanılan vazgeçilmez bir yöntemdir. Bu yöntem, sınırlı kaynakların en verimli şekilde kullanılmasını sağlamak amacıyla, projelerin sağladığı tüm faydaların, bu projelerin gerektirdiği maliyetlerle kıyaslanmasına dayanmaktadır. Ulaşım sistemlerinin büyük ölçekli ve genellikle karmaşık yapısı, fayda-maliyet analizinin uygulanmasını kritik hale getirmektedir. Bu analizler, projelerin yalnızca ekonomik getirilerini değil, aynı

zamanda çevresel sürdürülebilirlik, toplumsal eşitlik ve yaşam kalitesine olan etkilerini de dikkate alarak çok boyutlu bir değerlendirme sunmaktadır (Gülümser, 2022).

Ulaşım projelerinde fayda-maliyet analizinin uygulanmasında ilk adım, projenin hedeflerini ve kapsamını belirlemektir. Örneğin, yeni bir toplu taşıma hattı inşa etmek, trafik sıkışıklığını azaltmak, karbon salınımını düşürmek ve ulaşım erişilebilirliğini artırmak gibi çeşitli hedeflere sahip olabilir. Bu hedeflerin belirlenmesinin ardından, analiz süreci hem maliyetleri hem de faydaları detaylandırarak her iki unsuru ölçülebilir hale getirmektedir (Dilek vd., 2023). Maliyetlerin tespiti genellikle daha kolaydır; inşaat harcamaları, altyapı maliyetleri, enerji tüketimi, işletme giderleri ve bakım masrafları gibi unsurlar projelerin maliyet tarafını oluşturmaktadır. Ancak faydaların belirlenmesi, daha geniş bir perspektif ve kapsamlı bir değerlendirme gerektirmektedir. Bu faydalar arasında zaman tasarrufu, yakıt tüketimindeki azalma, hava kirliliğindeki düşüş, toplumsal sağlık üzerindeki olumlu etkiler ve ekonomik fırsatların artırılması yer almaktadır (Bacaksız, 2019).

2.3.2. Türkiye'de ulaşım projelerinin ekonomik değerlendirmeleri

Türkiye’de fayda-maliyet analizi (FMA), büyük ölçekli altyapı projelerinin planlanması, uygulanması ve değerlendirilmesi süreçlerinde giderek daha fazla önem kazanan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ülkenin hızla büyüyen şehir nüfusu, artan ulaşım talebi ve çevresel sürdürülebilirlik gereklilikleri, ulaşım sektöründe bu analizlerin kullanımını zorunlu hale getirmiştir. FMA, sınırlı kaynakların en verimli şekilde tahsisini sağlamak, yatırım kararlarını optimize etmek ve kamu kaynaklarının etkili bir şekilde kullanılmasını temin etmek için kullanılan bir araç olarak stratejik öneme sahiptir. Türkiye’de, FMA’nın uygulanışı, özellikle şehir içi ulaşım projeleri, otoyol ve köprü yatırımları, hızlı tren projeleri ve havalimanı projeleri gibi büyük ölçekli yatırımlarda öne çıkmaktadır (Ekşioğlu, 2012).

Türkiye’de fayda-maliyet analizinin önemi, son yıllarda gerçekleştirilen devasa ulaşım projeleriyle daha belirgin hale gelmiştir. Marmaray Projesi, Avrasya Tüneli, İstanbul Havalimanı ve Yavuz Sultan Selim Köprüsü gibi projeler, yalnızca ülke genelinde değil, uluslararası ölçekte de dikkat çeken yatırımlar arasında yer almıştır. Bu

projelerin her biri, planlama aşamasında FMA'ya dayalı olarak değerlendirilmiş ve ekonomik, çevresel ve sosyal etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Örneğin, Marmaray Projesi'nin fayda-maliyet analizinde, İstanbul Boğazı'nda yolcu taşımacılığını kolaylaştırarak trafik sıkışıklığını azaltması, zaman tasarrufu sağlaması ve karbon salınımını düşürmesi gibi faydalar ele alınmıştır. Bunun yanı sıra, işletme maliyetleri, inşaat harcamaları ve bakım masrafları gibi unsurlar da maliyet bileşenleri olarak değerlendirilmiştir (Örselli ve Akbay, 2019).

Türkiye'deki FMA çalışmaları, çoğunlukla kamu-özel sektör iş birliği (KÖİ) modeliyle gerçekleştirilen projelerde ön plana çıkmaktadır. Özellikle otoyol ve köprü projelerinde bu model sıklıkla tercih edilmekte, projelerin maliyet etkinliği FMA yoluyla analiz edilmektedir. Yavuz Sultan Selim Köprüsü ve Osmangazi Köprüsü projelerinde, trafik akışının hızlanması, yakıt tüketiminde azalma ve seyahat sürelerinin kısalması gibi faydalar dikkate alınmış, bu faydalar ekonomik göstergelerle desteklenmiştir. Ayrıca, bu projelerin çevresel etkileri de FMA sürecinde değerlendirilmiştir. Örneğin, Yavuz Sultan Selim Köprüsü'nün çevresel etkileri arasında, trafik yoğunluğunun azalmasıyla birlikte hava kalitesinin iyileşmesi ve karbon emisyonlarının düşürülmesi gibi unsurlar yer almıştır (İşler, 2018).

Hızlı tren projeleri de Türkiye'de FMA'nın önemli bir uygulama alanı olarak öne çıkmaktadır. Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Hattı, Türkiye'deki en büyük ulaşım projelerinden biri olarak, fayda-maliyet analizi kapsamında detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu proje, iki büyük şehir arasındaki seyahat süresini önemli ölçüde azaltarak zaman tasarrufu sağlamış, bireysel araç kullanımını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmuştur. Ayrıca, hızlı tren projesi, ekonomik kalkınmayı teşvik ederek ve iki şehir arasındaki ticari ilişkileri güçlendirerek dolaylı faydalar yaratmıştır. Bu faydaların yanı sıra, projenin maliyet unsurları arasında altyapı inşaat harcamaları, araç alımları ve bakım-onarım masrafları yer almıştır (Candan ve Gülpınar, 2023).

Türkiye'de FMA'nın kullanıldığı bir diğer önemli alan, şehir içi toplu taşıma projeleridir. Özellikle metrobüs hatları ve metro projeleri, FMA'nın etkin bir şekilde uygulandığı örnekler arasında yer almaktadır. İstanbul'da metrobüs hattının devreye alınması, şehir içindeki trafik sıkışıklığını hafifletmiş ve bireylerin seyahat sürelerini

önemli ölçüde kısaltmıştır. Bu proje kapsamında yapılan FMA’da, yakıt tüketimindeki azalma, toplumsal hareketlilikteki artış ve karbon emisyonlarının düşürülmesi gibi faydalar detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, işletme maliyetleri, altyapı yatırımları ve bakım masrafları gibi unsurlar maliyet bileşenleri olarak değerlendirilmiştir (Yılmaz, 2012).

FMA çalışmaları, yalnızca ekonomik ve çevresel etkileri değil, aynı zamanda sosyal faydaları da dikkate almaktadır. Türkiye’deki ulaşım projelerinin değerlendirilmesinde, toplumsal eşitlik ve erişilebilirlik unsurları önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, düşük gelirli bölgelerden geçen bir metro hattı, bu bölgelerde yaşayan bireylerin ekonomik fırsatlara erişimini artırabilir. Ayrıca, engelli bireyler için erişilebilirlik sağlayan altyapı projeleri, sosyal katılımı teşvik ederek toplumsal faydaları artırabilir (Eryiğit, 2020). Bu tür sosyal etkiler, FMA süreçlerinde dikkate alınarak projelerin bütüncül bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Türkiye’deki FMA uygulamalarında karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, projelerin çevresel ve sosyal etkilerinin parasallaştırılmasıdır. Örneğin, bir ulaşım projesinin hava kirliliğini azaltma potansiyeli, çevresel değerlendirme modelleriyle ölçülse de, bu etkilerin ekonomik değeri hakkında kesin bir sonuç elde etmek her zaman mümkün değildir. Benzer şekilde, toplumsal eşitlik ve erişim fırsatları gibi sosyal faydaların parasallaştırılması da zorluklar barındırmaktadır. Bu nedenle, Türkiye’deki FMA çalışmaları, yalnızca ekonomik göstergelere değil, aynı zamanda niteliksel değerlendirme yöntemlerine de dayanmaktadır (Bilgin, 2024). FMA’nın Türkiye’deki geleceği, bu analiz yönteminin daha geniş bir çerçevede uygulanmasına bağlıdır. Özellikle çevresel sürdürülebilirlik ve toplumsal eşitlik gibi unsurların daha etkin bir şekilde analizlere dahil edilmesi, projelerin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, veri kalitesinin artırılması ve analitik yöntemlerin geliştirilmesi, FMA’nın doğruluğunu ve güvenilirliğini artıracaktır. Gelecekte, Türkiye’deki FMA uygulamalarının, uluslararası standartlara daha fazla entegre olması ve daha geniş bir veri tabanına dayanması beklenmektedir.

2.4. Karbon Emisyonları ve Çevresel Etkiler

Kentsel ulaşım sistemlerinin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi, öncelikle karbon emisyonları ve bunların yarattığı ekolojik sonuçlar çerçevesinde değerlendirilmektedir. Fosil yakıt temelli toplu taşıma araçları, şehirlerdeki sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturarak hem yerel hava kalitesini hem de küresel iklim değişikliği süreçlerini doğrudan etkilemektedir. Bu emisyonların kentsel yaşam üzerindeki çok boyutlu etkileri, sadece çevresel değil, aynı zamanda halk sağlığı, ekonomik maliyetler ve sosyal eşitsizlikler açısından da değerlendirilmesi gereken kritik bir konu alanıdır. Toplu taşıma sistemlerinin karbon ayak izinin azaltılması, kentlerin iklim değişikliği ile mücadeledeki rolünü güçlendirirken, aynı zamanda yaşam kalitesinin artırılması ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, mevcut emisyon seviyelerinin analizi ve azaltım potansiyelinin değerlendirilmesi, düşük karbonlu teknolojilere geçişin gerekçelerini ve faydalarını anlamak için temel bir çerçeve sunmaktadır.

2.4.1. Ulaşım kaynaklı hava kirliliği ve toplumsal etkileri

Toplu taşıma sistemleri, modern şehirlerin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında kritik bir role sahiptir. Bu sistemler, bireysel araç kullanımını azaltarak, enerji verimliliğini artırarak ve karbon emisyonlarını düşürerek hem çevresel hem de toplumsal faydalar sağlamaktadır. Karbon emisyonları, ulaşım sektörü kaynaklı küresel sera gazı salınımının önemli bir bölümünü oluşturmakta olup, iklim değişikliğinin temel nedenleri arasında yer almaktadır. Toplu taşıma sistemleri, karbon emisyonlarının azaltılmasında stratejik bir araç olarak görülmekte ve bu sistemlerin yaygınlaştırılması, şehirlerin daha çevre dostu ve yaşanabilir hale gelmesine önemli katkılar sunmaktadır. Bununla birlikte, karbon emisyonlarının sadece çevresel değil, aynı zamanda sosyal etkileri de dikkate alındığında, bu konunun çok boyutlu bir şekilde ele alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Toplu taşıma sistemlerinin karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli, birkaç temel faktöre dayanmaktadır. İlk olarak, toplu taşıma araçları, aynı anda çok sayıda yolcu taşımaları nedeniyle enerji tüketiminde bireysel araçlara kıyasla daha verimlidir. Örneğin, bir otobüs veya tren, birden fazla otomobilin taşıyacağı yolcu sayısını tek bir araçla taşıyarak enerji

tasarrufu sağlar ve karbon salınımını azaltmaktadır. Elektrikli otobüsler, metrolar ve tramvaylar gibi düşük emisyonlu veya sıfır emisyonlu toplu taşıma araçları, bu etkileri daha da artırmaktadır. Özellikle elektrikle çalışan toplu taşıma sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenmesi, karbon nötr bir ulaşım ağı oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, toplu taşıma sistemleri, ulaşım sektörünün çevresel etkilerini azaltmada öncü bir rol üstlenmektedir.

Karbon emisyonlarının çevresel etkileri, iklim değişikliği üzerindeki katkılarıyla doğrudan ilişkilidir. Karbon dioksit ve diğer sera gazları, atmosferde birikerek küresel ısınmayı tetiklemekte ve doğal ekosistemleri olumsuz etkilemektedir. Küresel sıcaklıkların artması, buzulların erimesine, deniz seviyelerinin yükselmesine ve ekstrem hava olaylarının sıklığında artışa neden olmaktadır. Bu durum, özellikle kıyı bölgelerinde yaşayan topluluklar için ciddi tehditler oluşturmakta ve doğal yaşam alanlarını tahrip etmektedir. Ayrıca, artan sıcaklıklar, biyolojik çeşitliliği tehdit ederek birçok türün yok olmasına yol açmaktadır. Toplu taşıma sistemlerinin karbon emisyonlarını azaltmadaki rolü, bu olumsuz etkilerin hafifletilmesi açısından son derece önemlidir. Bireysel araç kullanımının azaltılması ve toplu taşımaya geçiş, şehirlerin karbon ayak izini küçülterek çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Karbon emisyonlarının çevresel etkileri kadar önemli olan bir diğer boyut, bu emisyonların sosyal etkileridir. Karbon emisyonlarının neden olduğu hava kirliliği, özellikle şehirlerde yaşayan bireylerin sağlığını olumsuz etkilemektedir. Hava kirliliğine bağlı solunum yolu hastalıkları, kardiyovasküler rahatsızlıklar ve erken ölümler, karbon emisyonlarının doğrudan sonuçları arasında yer almaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) göre, hava kirliliği, her yıl milyonlarca insanın ölümüne neden olan önemli bir halk sağlığı sorunudur. Toplu taşıma sistemleri, bireysel araç kullanımını azaltarak hava kirliliğini düşürmekte ve böylece halk sağlığını koruma noktasında önemli bir rol oynamaktadır. Elektrikli otobüsler ve trenler gibi düşük emisyonlu taşıma araçlarının yaygınlaştırılması, hava kalitesini iyileştirerek toplum sağlığını desteklemektedir.

Karbon emisyonlarının sosyal etkileri, yalnızca sağlıkla sınırlı değildir. Bu emisyonlar, ekonomik eşitsizliklerin derinleşmesine de katkıda bulunmaktadır. Örneğin, düşük gelirli topluluklar, genellikle karbon emisyonlarına daha fazla maruz kalan bölgelerde yaşamakta ve bu durum, bu gruplar için sağlık maliyetlerini

artırmaktadır. Toplu taşıma sistemleri, bu eşitsizlikleri hafifletmek için önemli bir araçtır. Erişilebilir ve uygun fiyatlı toplu taşıma sistemleri, düşük gelirli bireylerin ekonomik ve sosyal fırsatlara erişimini artırmakta ve toplumsal eşitliği teşvik etmektedir. Ayrıca, toplu taşıma sistemlerinin enerji verimliliği ve düşük işletme maliyetleri, uzun vadede ekonomik sürdürülebilirliği desteklemekte ve toplumsal refahı artırmaktadır.

Toplu taşıma sistemlerinin karbon emisyonlarına olan etkisi, şehirlerin sürdürülebilirlik politikalarıyla doğrudan ilişkilidir. Birçok şehir, karbon nötr olma hedefi doğrultusunda toplu taşıma sistemlerini modernize etmekte ve bu sistemlere yatırım yapmaktadır. Örneğin, bisiklet paylaşım sistemleri, elektrikli otobüs filoları ve genişletilmiş metro hatları, bireysel araç kullanımını caydırarak toplu taşımaya geçişi teşvik etmektedir. Bu tür politikalar, yalnızca karbon emisyonlarını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda trafik yoğunluğunu hafifletmekte ve şehirlerin genel yaşam kalitesini artırmaktadır.

Toplu taşıma sistemlerinin karbon emisyonlarına olan etkisi, modern şehirlerin sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda en kritik konulardan biridir. Ulaşım sektörü, küresel karbon emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturmakta ve bu durum, toplu taşıma sistemlerinin karbon azaltıcı potansiyelini vurgulamaktadır. Bireysel araç kullanımı yerine toplu taşıma araçlarının tercih edilmesi, enerji verimliliğini artırarak ve fosil yakıt tüketimini azaltarak karbon salınımını önemli ölçüde düşürmektedir. Bu sistemlerin geniş ölçekte uygulanması, yalnızca çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik hedefleri bakımından da büyük öneme sahiptir.

Toplu taşıma sistemlerinin karbon emisyonlarına etkisini anlamak için öncelikle bu sistemlerin sağladığı enerji verimliliği ve taşıma kapasitesine dikkat çekmek gerekmektedir. Bir otobüs ya da metro, aynı anda yüzlerce yolcu taşıyarak, bireysel araçlara kıyasla çok daha az enerji harcamaktadır. Özellikle yenilikçi teknolojilerle donatılmış elektrikli otobüsler ve trenler, karbon salınımını sıfıra yaklaştırma potansiyeline sahiptir. Elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşması, fosil yakıt tüketimini azaltırken, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilmiş toplu taşıma sistemleri, karbon nötr şehirler yaratma hedefine katkıda bulunmaktadır. Örneğin, bir

metro sistemi, günde binlerce insanı taşıyarak, yüzlerce bireysel aracın trafikten çekilmesini sağlayabilir. Bu durum, şehirlerin karbon ayak izini küçültmekte ve enerji tüketimini optimize etmektedir.

2.4.2. Toplu taşıma sistemlerinin karbon emisyonlarına etkisi

Toplu taşıma sistemleri, küresel karbon emisyonlarının azaltılmasında stratejik bir araç olarak ön plana çıkmaktadır. Ulaşım sektörü, fosil yakıt tüketiminin ve karbon salınımının en büyük kaynaklarından biri olarak, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yeniden şekillendirilmeye ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda, toplu taşıma sistemleri, bireysel araç kullanımını azaltarak, enerji verimliliğini artırarak ve yenilikçi teknolojilerle karbon salınımını minimuma indirerek hem çevresel hem de toplumsal faydalar sunmaktadır. Bu sistemler, şehirlerin karbon ayak izini küçültme, hava kalitesini iyileştirme ve iklim değişikliği ile mücadele etme gibi kritik hedeflere ulaşmasında merkezi bir role sahiptir (Civelekoğlu ve Bıyık, 2018).

Toplu taşıma sistemlerinin emisyon azaltımındaki rolünü anlamak için, bu sistemlerin enerji tüketimindeki verimliliklerini ve taşıma kapasitelerini değerlendirmek gerekmektedir. Toplu taşıma araçları, birden fazla yolcuğu aynı anda taşıma kapasitesine sahip olduğu için, bireysel araçlara kıyasla birim başına çok daha az enerji tüketmektedir. Örneğin, bir metro hattı ya da bir otobüs filosu, yüzlerce insanı tek bir araçla taşıırken, aynı miktarda yolcuğu taşımak için yüzlerce otomobile ihtiyaç duyulacaktır. Bu durum, enerji tüketiminde büyük bir azalma sağlayarak karbon emisyonlarını düşürmektedir (Akbulut, 2016). Elektrikli otobüsler, tramvaylar ve trenler gibi yenilikçi araçların kullanımı, bu etkileri daha da artırarak, sıfır karbon hedeflerine ulaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilmiş toplu taşıma sistemleri, karbon salınımını sıfıra yaklaştıran bir ulaşım ağı oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Karbon emisyonlarının azaltılmasında toplu taşıma sistemlerinin etkinliğini artıran bir diğer faktör, bu sistemlerin trafik yoğunluğunu hafifletme kapasitesidir. Büyük şehirlerde trafik sıkışıklığı, araçların dur-kalk yaparak daha fazla yakıt tüketmesine ve dolayısıyla daha fazla karbon salınımına neden olmaktadır. Toplu taşıma sistemlerinin yaygınlaştırılması, bireysel araç kullanımını azaltarak bu yoğunluğu önemli ölçüde hafifletmektedir. Örneğin, metrobüs hatları veya raylı sistemler, binlerce insanı aynı

anda taşırken, trafikteki araç sayısını azaltmakta ve karbon salınımını düşürmektedir. Ayrıca, bu tür sistemlerin kullanımı, trafik sıkışıklığı nedeniyle harcanan zamanın azaltılmasına da katkı sağlamak ve ekonomik verimliliği artırmaktadır (Tarhan ve Ercoşkun, 2023).

Toplu taşıma sistemleri, yalnızca karbon emisyonlarının azaltılmasında değil, aynı zamanda hava kirliliğinin düşürülmesinde de etkili bir rol oynamaktadır. Karbon dioksit (CO₂) gibi sera gazlarının yanı sıra, bireysel araçların egzozlarından yayılan partikül madde (PM), azot oksitler (NO_x) ve sülfür dioksit (SO₂) gibi kirleticiler, hava kalitesini olumsuz etkileyerek hem çevresel hem de toplumsal zararlar yaratmaktadır (Akarsu, 2022). Toplu taşıma sistemlerinin düşük emisyonlu veya sıfır emisyonlu araçlarla modernize edilmesi, bu kirleticilerin atmosfere salınımını büyük ölçüde azaltmaktadır. Elektrikli otobüsler ve trenler gibi araçların yaygınlaşması, şehirlerdeki hava kalitesini iyileştirmekte ve bireylerin sağlığını korumaya katkıda bulunmaktadır. Bu durum, yalnızca çevresel faydalar sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda kamu sağlığı harcamalarını azaltarak ekonomik kazanımlar da sunmaktadır (Barut, 2012).

Toplu taşıma sistemlerinin emisyon azaltımındaki rolü, teknolojik yeniliklerle daha da güçlenmektedir. Örneğin, akıllı ulaşım sistemleri, toplu taşıma araçlarının enerji tüketimini optimize etmekte ve daha verimli bir hizmet sunmaktadır. Otobüslerin rotalarının optimize edilmesi, metro hatlarının enerji tüketimini azaltan sistemlerle donatılması ve elektrikli şarj altyapılarının yaygınlaştırılması, toplu taşıma sistemlerinin karbon emisyonlarını azaltmada daha etkin hale gelmesini sağlamaktadır. Ayrıca, hibrit ve tam elektrikli otobüslerin kullanımı, fosil yakıt tüketimini önemli ölçüde azaltarak, toplu taşıma sistemlerini daha çevre dostu hale getirmektedir. Bu tür teknolojilerin yaygınlaştırılması, şehirlerin sürdürülebilirlik hedeflerine daha hızlı ulaşmasına olanak tanımaktadır (Kenanoğlu ve Aydın, 2018). Toplu taşıma sistemlerinin emisyon azaltımındaki rolü, yalnızca çevresel etkilerle sınırlı değildir. Bu sistemler, toplumsal eşitliği artırarak ve ekonomik fırsatlara erişimi kolaylaştırarak sosyal sürdürülebilirliğe de katkı sağlamaktadır. Örneğin, düşük gelirli bireylerin uygun fiyatlı ve erişilebilir toplu taşıma hizmetlerinden yararlanabilmesi, bireysel araç kullanımına bağımlılığı azaltmakta ve bu grupların ekonomik ve sosyal fırsatlara daha kolay erişmesini sağlamaktadır. Bu durum, yalnızca toplumsal eşitliği teşvik etmekle kalmamakta, aynı zamanda bireysel araç sahipliği oranını düşürerek

karbon emisyonlarını azaltmaktadır. Ayrıca, toplu taşıma sistemlerinin enerji maliyetlerinin daha düşük olması, kamu bütçesine daha az yük getirmekte ve uzun vadede ekonomik faydalar sağlamaktadır (Öncü, 2007).

Ulaşım sektörünün karbon salınımı üzerindeki etkisi, küresel ölçekte çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini tehdit eden temel unsurlardan biridir. Toplu taşıma sistemleri, bireysel araç kullanımını azaltarak, enerji kaynaklarını daha verimli bir şekilde kullanarak ve teknolojik yeniliklerle desteklenerek karbon salınımını düşürmekte etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda toplu taşıma sistemlerinin yaygınlaştırılması, yalnızca çevresel koruma sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda şehirlerin sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında da önemli bir rol oynamaktadır (Dündar ve Kolay, 2021). Toplu taşıma sistemlerinin emisyon azaltımındaki temel katkısı, taşıma başına enerji tüketimini optimize etmeleridir. Bireysel araçların her biri yalnızca birkaç yolcu taşırken, bir otobüs, tren ya da metro aracı, yüzlerce yolcu aynı anda taşıyabilmektedir. Bu yüksek taşıma kapasitesi, fosil yakıt tüketimini ve dolayısıyla karbon salınımını önemli ölçüde azaltmaktadır (Tektaş, 2008). Özellikle elektrikli otobüsler ve trenler gibi sıfır emisyonlu taşıma araçlarının kullanımı, karbon azaltımında daha da büyük bir etki yaratmaktadır. Bu tür araçlar, fosil yakıt kullanımını tamamen ortadan kaldırarak, enerji kaynaklarının çevre dostu bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Dahası, toplu taşıma altyapısının yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilmesi, karbon salınımını minimum seviyeye indiren sürdürülebilir ulaşım ağlarının oluşumunu desteklemektedir (Bulut ve Adıgüzel, 2023).

Şehirlerde trafik sıkışıklığının azaltılması, toplu taşıma sistemlerinin emisyon azaltımındaki bir diğer önemli etkisidir. Yoğun trafik, araçların sık sık durup kalkmasına ve bu nedenle daha fazla yakıt tüketmesine yol açmaktadır. Bu durum, yalnızca karbon salınımını artırmakla kalmaz, aynı zamanda hava kalitesini de olumsuz etkilemektedir. Toplu taşıma sistemleri, bireysel araç kullanımını azaltarak trafikteki araç yoğunluğunu hafifletmekte ve yakıt tüketimini düşürmektedir. Metrobüs hatları, raylı sistemler ve diğer toplu taşıma araçları, yüzlerce bireysel aracın yerini alarak hem enerji tasarrufu sağlar hem de karbon emisyonlarını büyük ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, trafik sıkışıklığının azalması, seyahat sürelerini kısaltarak

ekonomik verimliliği arttırmakta ve bireylerin yaşam kalitesini yükseltmektedir (Yavuz, 2024).

Toplu taşıma sistemlerinin emisyon azaltımındaki rolü, yalnızca fosil yakıt kullanımını azaltmakla sınırlı değildir. Bu sistemler aynı zamanda hava kirliliğini ve diğer çevresel zararları da önler. Karbon dioksit (CO₂) salınımının yanı sıra, bireysel araçların egzozlarından yayılan azot oksitler (NO_x), sülfür dioksit (SO₂) ve partikül maddeler (PM), şehirlerde hava kalitesini olumsuz etkilemektedir. Toplu taşıma sistemlerinin elektrikli araçlarla donatılması, bu kirleticilerin atmosferdeki miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durum, şehirlerdeki hava kalitesinin iyileşmesine katkıda bulunur ve halk sağlığını koruma açısından büyük bir önem taşımaktadır. Daha temiz bir atmosfer, solunum yolu hastalıklarının ve diğer sağlık sorunlarının azalmasına yol açar ve kamu sağlığı harcamalarını düşürerek ekonomik faydalar sağlamaktadır (Arslan, 2010).

Toplu taşıma sistemlerinin karbon salınımını azaltmadaki başarısı, büyük ölçüde teknolojik yeniliklerle desteklenmektedir. Akıllı ulaşım sistemleri, toplu taşıma araçlarının enerji tüketimini optimize ederek ve verimliliğini artırarak karbon emisyonlarını minimuma indirmektedir. Örneğin, otobüslerin güzergahlarının enerji tüketimini azaltacak şekilde optimize edilmesi, metro sistemlerinin enerji tasarrufu sağlayan teknolojilerle donatılması ve elektrikli şarj altyapılarının yaygınlaştırılması, toplu taşıma sistemlerinin çevresel etkilerini en aza indirmektedir. Ayrıca, hibrit ve tamamen elektrikli otobüslerin yaygınlaştırılması, fosil yakıt kullanımını sınırlamakta ve ulaşım sistemlerini çevre dostu bir hale getirmektedir. Bu tür teknolojiler, şehirlerin karbon azaltım hedeflerine ulaşmasını hızlandırmaktadır (Candan ve Gülpınar, 2023).

2.4.3. İklim değişikliği ve kentsel hareketlilik arasındaki ilişki

İklim değişikliği, günümüzde küresel düzeyde karşılaşılan en büyük çevresel ve toplumsal tehditlerden biri olarak kabul edilmektedir. İnsan kaynaklı faaliyetlerden, özellikle fosil yakıt tüketimi, sanayileşme ve enerji yoğun ulaşım sistemlerinden kaynaklanan karbon emisyonları, iklim değişikliğinin temel nedenlerinden biridir (Erdoğan, 2018). Bu bağlamda, şehirlerin sürdürülebilirliği açısından kentsel hareketlilik sistemleri ile iklim değişikliği arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır.

Kentsel hareketlilik, ulaşım ağlarının karbon salınımını azaltma, enerji verimliliğini artırma ve çevresel etkileri en aza indirme potansiyeliyle, iklim değişikliği ile mücadelede stratejik bir araç haline gelmiştir. Ancak bu ilişki, yalnızca çevresel boyutlarla sınırlı olmayıp, toplumsal eşitlik, ekonomik kalkınma ve yaşam kalitesi gibi çok boyutlu etkileri de kapsamaktadır (Bayraktar, 2020).

Kentsel hareketlilik sistemleri, iklim değişikliği üzerindeki etkilerini belirleyen iki temel faktöre dayanmakta: karbon emisyonlarının düzeyi ve bu emisyonların şehirlerin iklimsel kırılganlığı üzerindeki etkisi. Fosil yakıtlı araçlara dayalı geleneksel ulaşım sistemleri, küresel karbon salınımının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu durum, özellikle yoğun nüfuslu şehirlerde daha belirgin hale gelmekte ve iklim değişikliği üzerindeki etkilerin artmasına yol açmaktadır. Öte yandan, sürdürülebilir kentsel hareketlilik sistemleri, bu olumsuz etkileri azaltma potansiyeline sahiptir (Kahraman, 2018). Elektrikli otobüsler, bisiklet paylaşım sistemleri, raylı taşımacılık ve yaya dostu altyapılar gibi düşük karbonlu hareketlilik çözümleri, bireysel araç kullanımını azaltarak şehirlerin karbon ayak izini küçültmektedir. Bu tür sistemler, aynı zamanda enerji verimliliğini artırarak ve yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre ederek, şehirlerin iklim değişikliğine karşı daha dirençli hale gelmesini sağlamaktadır (Fidan vd., 2022).

Kentsel hareketliliğin iklim değişikliği üzerindeki etkisi, yalnızca karbon salınımıyla sınırlı değildir. Hareketlilik sistemlerinin şehirlerin fiziksel ve sosyal yapıları üzerindeki etkileri de dikkate alınmalıdır. İklim değişikliği, şehirlerin altyapılarına zarar vererek ulaşım sistemlerini olumsuz etkileyebilmektedir. Örneğin, deniz seviyesinin yükselmesi, kıyı bölgelerindeki ulaşım altyapısını tehdit etmekte ve bu bölgelerdeki kentsel hareketliliği sınırlamaktadır. Benzer şekilde, aşırı sıcaklıklar ve ekstrem hava olayları, yolların, köprülerin ve raylı sistemlerin dayanıklılığını azaltarak ulaşım sistemlerini daha kırılgan hale getirebilmektedir. Bu bağlamda, kentsel hareketlilik sistemlerinin iklim değişikliği bağlamında dayanıklılığını artırmak, sürdürülebilir şehirlerin inşasında kritik bir öneme sahiptir (Ulusoy, 2017).

Sürdürülebilir kentsel hareketlilik, iklim değişikliği ile mücadelede temel bir araç olmakla birlikte, aynı zamanda toplumsal eşitlik ve yaşam kalitesi üzerinde de olumlu etkiler yaratmaktadır. Düşük karbonlu hareketlilik çözümleri, bireysel araç sahipliğine

olan bağımlılığı azaltarak, daha geniş bir kitle için ulaşımı erişilebilir hale getirmektedir. Özellikle düşük gelirli bireylerin, toplu taşıma sistemlerine uygun maliyetle erişebilmesi, bu grupların ekonomik ve sosyal fırsatlara erişimini artırmaktadır. Ayrıca, bisiklet yolları ve yaya dostu bölgeler gibi hareketlilik çözümleri, yalnızca çevresel faydalar sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda şehir sakinlerinin fiziksel sağlığını desteklemekte ve yaşam kalitesini artırmaktadır (Benk ve Akdemir, 2010). İklim değişikliği ve kentsel hareketlilik arasındaki ilişkinin bir diğer önemli boyutu, enerji tüketimi ve kaynak kullanımıdır. Fosil yakıtların yoğun bir şekilde kullanıldığı geleneksel ulaşım sistemleri, enerji kaynaklarının hızlı bir şekilde tükenmesine yol açmaktadır. Bu durum, yalnızca çevresel etkiler yaratmakla kalmamakta, aynı zamanda enerji maliyetlerini artırarak ekonomik sürdürülebilirliği de tehdit etmektedir. Bununla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalışan kentsel hareketlilik sistemleri, enerji tüketimini azaltarak ve kaynakları daha verimli bir şekilde kullanarak bu sorunlara çözüm sunmaktadır. Örneğin, güneş enerjisiyle çalışan otobüsler veya rüzgar enerjisiyle desteklenen şarj istasyonları, şehirlerin enerji bağımlılığını azaltmakta ve karbon salınımını minimum seviyeye indirmektedir (Sarıçoban, 2011).

Kentsel hareketlilik sistemlerinin planlanmasında, iklim değişikliği ile mücadele hedeflerinin dikkate alınması, gelecekte şehirlerin daha dirençli ve sürdürülebilir hale gelmesine olanak tanımaktadır. Akıllı ulaşım sistemleri, bu bağlamda önemli bir rol oynamaktadır. Gerçek zamanlı veri analitiği ve dijital teknolojiler, trafik akışını optimize etmekte, enerji tüketimini azaltmakta ve toplu taşıma sistemlerini daha verimli hale getirmektedir. Ayrıca, bu tür teknolojiler, şehir sakinlerinin hareketlilik ihtiyaçlarına daha hızlı ve etkili çözümler sunarak, bireysel araç kullanımını caydırmaktadır. Akıllı ulaşım teknolojileri, yalnızca karbon salınımını azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda kentsel hareketlilik sistemlerini daha sürdürülebilir ve kullanıcı dostu bir yapıya kavuşturmaktadır (Türkkan, 2019).

3. YÖNTEM

Araştırma yönteminin belirlenmesi, bilimsel çalışmaların güvenilirliği ve geçerliliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu bölümde, Antalya ili toplu taşıma sisteminde düşük karbonlu teknolojilere geçişin çok boyutlu etkilerini değerlendirmek amacıyla benimsenecek metodolojik çerçeve detaylandırılmaktadır. Sürdürülebilir kentsel hareketlilik konusunun karmaşık yapısı ve çoklu disiplinler niteliği, araştırma sürecinde farklı veri toplama yöntemlerinin ve analiz tekniklerinin entegre edilmesini gerektirmektedir. Bu nedenle, çalışmada konunun ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarının kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi hedeflenmektedir. Metodolojik yaklaşımın seçiminde, araştırma sorularının doğası, mevcut veri kaynaklarının erişilebilirliği ve analiz sonuçlarının politika geliştirme süreçlerine katkı sağlama potansiyeli temel belirleyici faktörler olmuştur.

3.1. Araştırma Yaklaşımı ve Modeli

Bu araştırma, sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında toplu taşıma sisteminde düşük karbon teknolojilerine geçiş sürecini değerlendirmek amacıyla betimsel bir araştırma modeli çerçevesinde tasarlanmıştır. Çalışma, Antalya ili toplu taşıma sisteminde fosil yakıtlı araçlardan elektrikli otobüslere geçişin çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerini analiz etmeyi hedeflemektedir. Araştırmanın temelinde, sürdürülebilir ulaşım politikaları, karbon emisyonlarının azaltılması, enerji verimliliği ve uzun vadeli maliyet-fayda dengesi gibi unsurlar yer almaktadır. Bu kapsamda, toplu taşıma sistemlerinde düşük karbonlu teknolojilere geçişin uygulanabilirliği, mevcut ulaşım altyapısı ve bu dönüşümün kentsel hareketlilik üzerindeki etkileri ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

Araştırma modeli, nicel veri analizine dayalı olarak şekillendirilmiştir. Bu bağlamda, toplu taşıma sistemlerine yönelik mevcut veriler incelenerek, düşük karbonlu ulaşım teknolojilerinin sağlayacağı avantajlar bilimsel bir perspektiften değerlendirilmektedir. Elektrikli otobüslerin mevcut dizel ve LPG'li otobüslere kıyasla karbon emisyonlarını ne ölçüde azaltabileceği, işletme maliyetlerindeki değişim ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından getireceği potansiyel kazanımlar fayda-maliyet analizi yöntemi kullanılarak hesaplanmaktadır. Ayrıca, bu dönüşümün

toplu taşıma sistemine entegrasyonu sürecinde karşılaşılabilecek teknik ve finansal zorluklar, literatürde yer alan benzer çalışmalar ve mevcut politika belgeleri doğrultusunda tartışılmaktadır. Bu sayede, araştırma modeli, yalnızca teorik yaklaşımlar üzerinden değil, aynı zamanda somut veriler ve hesaplamalar yoluyla desteklenmektedir.

Çalışmada kullanılan yöntem, mevcut ulaşım sisteminin performans göstergelerini analiz etmeye yönelik olup, toplu taşıma araçlarının enerji tüketimi, yolcu kapasiteleri, işletme maliyetleri ve çevresel etkileri gibi parametreleri içermektedir. Elektrikli otobüslerin enerji verimliliği, işletme ve bakım maliyetleri, karbon salınımı üzerindeki etkileri, ulaşım süresi ve kentsel hareketliliğe katkısı gibi faktörler dikkate alınarak karşılaştırmalı bir analiz yürütülmüştür. Bu analiz, düşük karbon teknolojilerinin yaygınlaştırılmasının şehirlerin sürdürülebilirlik hedefleriyle nasıl örtüştüğünü ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Araştırma modelinin temel dayanağı, sürdürülebilir ulaşım politikalarının şehirlerin çevresel etkilerini azaltmadaki rolünü ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, model, mevcut ulaşım sisteminin karbon ayak izini belirleyerek, düşük karbonlu teknolojilere geçişin bu emisyonları nasıl azaltabileceğini ortaya koyan bir çerçeve sunmaktadır. Elektrikli otobüslerin uzun vadeli kullanım maliyetleri, yakıt tasarrufu ve şehir içi hava kalitesi üzerindeki etkileri de bu model kapsamında değerlendirilmiştir. Araştırmanın bulgularının, Antalya gibi hızla büyüyen şehirlerde sürdürülebilir ulaşım politikalarının oluşturulmasına katkı sağlaması beklenmektedir. Sonuç olarak, bu model, düşük karbonlu toplu taşıma sistemlerine geçişin kentsel hareketlilik üzerindeki etkilerini bilimsel bir perspektifle değerlendirerek, politika yapıcılara yol gösterici olabilecek veriler sunmayı amaçlamaktadır.

3.2. Veri Toplama Yöntemleri

Bu çalışmada, sürdürülebilir kentsel hareketlilik bağlamında toplu taşıma sisteminde düşük karbon teknolojilerine geçiş sürecinin ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarını değerlendirmek amacıyla betimsel ve analitik bir yöntem benimsenmiştir. Veri toplama süreci, mevcut ulaşım sistemine ilişkin sayısal verilerin analizine dayalı olup, ikincil veri kaynakları üzerinden kapsamlı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Çalışmada

kullanılan veri toplama araçları, akademik literatür taraması, resmi kurum ve kuruluşların sağladığı istatistiksel veriler, ulusal ve uluslararası politika belgeleri, çevresel ve ekonomik etki raporları ile teknolojik fizibilite çalışmaları gibi çok yönlü kaynaklardan oluşmaktadır. Bu kapsamda, araştırmada veri çeşitliliğinin sağlanması için disiplinlerarası bir yaklaşım benimsenmiş olup, ulaşım mühendisliği, çevre bilimleri, ekonomi ve şehir planlama gibi farklı alanlardan elde edilen veriler entegre edilmiştir.

Araştırmada kullanılan en temel veri kaynakları, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı gibi kamu kurumlarının yayımladığı ulaşım ve çevresel sürdürülebilirlik raporlarıdır. Bu belgeler, toplu taşıma sistemlerinde fosil yakıtlı araçların mevcut kullanım durumu, karbon emisyon oranları, ulaşım maliyetleri ve toplu taşıma talebi gibi kritik göstergeleri içermektedir. Ayrıca, yerel ve uluslararası düzeyde yayımlanan düşük karbonlu ulaşım politikalarına yönelik raporlar incelenerek, bu tür dönüşümlerin uygulanabilirliği ve başarı kriterleri üzerine çıkarımlar yapılmıştır. Bunun yanı sıra, Dünya Bankası, Avrupa Birliği Komisyonu, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ve Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) gibi küresel kuruluşların yayımladığı sürdürülebilir ulaşım politikaları ve karbon azaltım hedeflerine yönelik raporlar, çalışmanın teorik ve uygulamalı çerçevesinin oluşturulmasında önemli bir kaynak teşkil etmiştir.

Veri toplama sürecinde ayrıca, Antalya ili toplu taşıma sistemine yönelik teknolojik fizibilite analizleri, elektrikli otobüslerin operasyonel verimliliğini ortaya koyan bilimsel çalışmalar ve düşük karbon teknolojilerinin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini değerlendiren teknik raporlar incelenmiştir. Özellikle, dizel ve LPG'li otobüsler ile elektrikli otobüslerin yakıt tüketimi, işletme maliyetleri, bakım gereksinimleri ve karbon salınımı açısından karşılaştırıldığı mevcut saha çalışmaları detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu bağlamda, düşük karbon teknolojilerine geçiş sürecinin fayda-maliyet analizine yönelik istatistiksel modellemelere dayalı çalışmalar, araştırmanın ekonomik değerlendirme sürecine önemli katkılar sağlamaktadır.

Literatür taraması kapsamında, sürdürülebilir ulaşım ve düşük karbonlu teknolojilere yönelik akademik makaleler, tezler ve bilimsel raporlar incelenerek, konuyla ilgili güncel teorik ve ampirik yaklaşımlar değerlendirilmiştir. Özellikle, elektrikli toplu taşıma sistemlerinin farklı şehirlerde uygulanmasına yönelik akademik çalışmaların karşılaştırmalı analizi, Antalya ili için geliştirilecek önerilerin rasyonel bir temele dayanmasını sağlamaktadır. Araştırmada kullanılan ikincil veri kaynakları, yalnızca mevcut durumu ortaya koymakla kalmayıp, aynı zamanda bu dönüşümün potansiyel etkilerine yönelik öngörülerde bulunmak için de değerlendirilmiştir.

3.3. Veri Analiz Teknikleri

Bu araştırmada, sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında toplu taşıma sistemlerinde düşük karbonlu teknolojilere geçişin çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerini belirlemek amacıyla elde edilen verilerin analizinde çok boyutlu bir yöntemsel yaklaşım benimsenmiştir. Verilerin analizi, fayda-maliyet analizi, karşılaştırmalı istatistiksel değerlendirme ve çevresel etki modellemeleri gibi nicel analiz tekniklerine dayanmaktadır. Bu kapsamda, öncelikle Antalya ili toplu taşıma sistemine ilişkin mevcut durum verileri incelenmiş, ardından düşük karbon teknolojilerinin entegrasyonunun potansiyel etkilerini öngörmeye yönelik hesaplamalar yapılmıştır.

Araştırma kapsamında kullanılan fayda-maliyet analizi (FMA) yöntemi, düşük karbon teknolojilerine geçişin ekonomik uygulanabilirliğini belirlemek için temel bir araç olarak benimsenmiştir. Bu analizde, elektrikli otobüslerin ilk yatırım maliyetleri, işletme giderleri, bakım maliyetleri ve şarj altyapısı yatırımları dikkate alınarak, dizel ve LPG'li otobüslerle karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. Aynı zamanda, karbon emisyonlarının azalmasına bağlı olarak ortaya çıkacak çevresel faydalar da ekonomik terimlerle ifade edilerek, toplam maliyetler ve beklenen faydalar arasındaki denge incelenmiştir. Elektrikli otobüslerin uzun vadeli ekonomik avantajlarını belirlemek amacıyla net bugünkü değer (NBD), fayda-maliyet oranı (FMO) ve iç verim oranı (İVO) hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve bu göstergeler üzerinden sistemin ekonomik sürdürülebilirliği değerlendirilmiştir.

Çevresel sürdürülebilirlik bağlamında, karbon ayak izi analizi ve sera gazı emisyon hesaplamaları yapılmıştır. Bu kapsamda, mevcut fosil yakıtlı toplu taşıma araçlarının yıllık karbon salınımı verileri ile elektrikli araçlara geçiş senaryosunda ortaya çıkacak karbon azaltımı karşılaştırılmıştır. Elektrikli otobüslerin enerji tüketim profilleri, kullanılan elektrik kaynaklarının karbon yoğunluğu ile birlikte değerlendirilmiş ve yaşam döngüsü analizi (LCA) yöntemi kullanılarak, üretimden kullanım ömrü sonuna kadar olan süreçteki toplam karbon emisyonları hesaplanmıştır. Bu analiz, düşük karbonlu teknolojilere geçişin çevresel etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koyarak, bu dönüşümün iklim değişikliği ile mücadelede sağlayabileceği katkıyı değerlendirmeye olanak tanımıştır.

Ulaşım sistemlerinde düşük karbon teknolojilerinin entegrasyonunun operasyonel verimliliği üzerindeki etkilerini belirlemek için çok kriterli karar analizi (ÇKKA) uygulanmıştır. Bu analiz yöntemi, elektrikli otobüslerin mevcut sistemdeki dizel ve LPG'li otobüslerle karşılaştırıldığında enerji verimliliği, işletme maliyetleri, yolcu taşıma kapasitesi ve bakım gereksinimleri gibi çeşitli performans göstergeleri açısından avantajlarını ve dezavantajlarını ölçmeye olanak tanımaktadır. TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) ve AHP (Analytic Hierarchy Process) gibi çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak, düşük karbonlu toplu taşıma sistemlerinin sürdürülebilir kentsel hareketlilik açısından en uygun seçenek olup olmadığı belirlenmiştir.

Ekonomik analiz sürecinde, araştırma kapsamında kullanılan ulaşım verileri zaman serisi analizine tabi tutulmuş, böylece fosil yakıtlı toplu taşıma araçlarının enerji tüketimi ve maliyet eğilimleri ile düşük karbon teknolojilerinin potansiyel tasarruf oranları öngörülme çalışılmıştır. Regresyon analizi ile elektrikli otobüslerin kullanımının yakıt maliyetleri ve karbon emisyonları üzerindeki etkileri değerlendirilirken, bu dönüşüm sürecinin uzun vadeli ekonomik getirisini belirlemek için duyarlılık analizi uygulanmıştır. Duyarlılık analizi, enerji fiyatları, devlet teşvikleri ve altyapı maliyetleri gibi değişken faktörlerin model sonuçları üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

Araştırmada ayrıca, uluslararası sürdürülebilir ulaşım politikalarına ilişkin veriler ile Antalya ili özelinde gerçekleştirilen analizler karşılaştırılarak karşılaştırmalı politika

analizi yapılmıştır. Avrupa Birliği, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ve Dünya Bankası gibi küresel kuruluşların sürdürülebilir ulaşım politikaları ve düşük karbonlu toplu taşıma uygulamalarına yönelik veriler, Antalya ili bağlamında uygulanabilirlik açısından değerlendirilmiştir. Bu analiz, yerel yönetimlerin düşük karbonlu toplu taşıma politikalarını şekillendirirken dikkate alması gereken faktörleri belirlemeye yönelik bir çerçeve sunmuştur.

3.4. Fayda-Maliyet Analizi Metodolojisi

Bu araştırmada, Antalya ili toplu taşıma sisteminde düşük karbon teknolojilerine geçiş sürecinin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğini değerlendirmek amacıyla fayda-maliyet analizi (FMA) yöntemi kullanılmıştır. FMA, belirli bir yatırım veya politika değişikliğinin uzun vadede sağlayacağı faydalar ile bu dönüşümün getirdiği maliyetleri karşılaştırarak karar alma süreçlerine bilimsel bir temel sunan analitik bir yaklaşımdır. Özellikle kamu yatırımlarında ve altyapı projelerinde kullanılan bu yöntem, sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin ekonomik uygulanabilirliğini belirlemede önemli bir araçtır. Bu çerçevede, analiz süreci öncelikle mevcut ulaşım sistemine dair maliyet ve emisyon verilerinin toplanması ile başlamış, ardından elektrikli otobüslerin sisteme entegrasyonu senaryosunda ortaya çıkacak potansiyel maliyetler ve beklenen faydalar belirlenerek ekonomik modelleme yapılmıştır.

Araştırma kapsamında, mevcut ulaşım sisteminde kullanılan dizel ve LPG'li otobüslerin yakıt tüketim maliyetleri, bakım giderleri, işletme verimlilikleri ve karbon emisyon oranları detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu sistemin mevcut koşullar altında devam etmesi durumunda karşılaşılabilecek uzun vadeli maliyetler ve çevresel etkiler değerlendirilerek, fosil yakıt kullanımına bağlı emisyon miktarları hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, ulusal ve uluslararası kaynaklardan elde edilen karbon emisyon katsayıları ile karşılaştırılarak Antalya iline özgü bir model oluşturulmuştur. Elektrikli otobüslere geçiş senaryosu kapsamında ise, bu dönüşümün gerektirdiği ilk yatırım maliyetleri, altyapı yatırımları ve işletme süreçlerine ilişkin ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Elektrikli otobüslerin satın alma maliyetleri, şarj altyapısının kurulumu, enerji tüketimi ve bakım süreçlerine ilişkin maliyet unsurları belirlenmiş, mevcut fosil yakıtlı sistem ile karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır.

Elektrikli otobüslerin mevcut sisteme entegrasyonunun sağlayacağı çevresel, ekonomik ve toplumsal faydalar nicel analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çevresel boyutta, karbon emisyonlarında beklenen azalma, hava kirliliğine bağlı sağlık maliyetlerindeki düşüş ve gürültü kirliliğinin azalması gibi unsurlar dikkate alınmıştır. Ekonomik açıdan ise, fosil yakıt tüketiminin ortadan kalkmasıyla sağlanacak maliyet tasarrufu, işletme ve bakım giderlerindeki azalma ve elektrikli otobüslerin uzun vadede daha düşük maliyetle çalıştırılabilmesi gibi faktörler değerlendirilmiştir. Toplumsal faydalar açısından, şehir sakinlerinin daha temiz bir hava soluması, toplu taşıma sisteminin modernizasyonu ile ulaşım konforunun artması ve sürdürülebilir ulaşım politikalarına yönelik kamuoyunda farkındalığın artırılması gibi faktörler analiz edilmiştir.

FMA kapsamında, net bugünkü değer (NBD) hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve elektrikli otobüslerin uzun vadede ekonomik olarak uygulanabilir olup olmadığı belirlenmiştir. NBD hesaplamalarında, dönüşüm sürecinde ortaya çıkacak maliyetlerin iskonto edilerek bugünkü değerleri bulunmuş, aynı şekilde elektrikli otobüslerin sağlayacağı maliyet avantajları ve emisyon azaltımına bağlı ekonomik kazanımlar hesaplanarak gelecekte elde edilecek faydaların bugünkü değeri belirlenmiştir. Analiz sonucunda, yatırımın ekonomik olarak sürdürülebilir olup olmadığı değerlendirilmiş ve bu dönüşümün finansal fizibilitesi ortaya konmuştur. Bununla birlikte, fayda-maliyet oranı (FMO) hesaplanarak, dönüşümün sağlayacağı ekonomik kazançların yatırım maliyetlerine oranı belirlenmiş, 1'den büyük çıkan sonuçlar yatırımın ekonomik açıdan avantajlı olduğunu göstermiştir.

Araştırmada ayrıca iç verim oranı (İVO) hesaplamaları yapılmış, yatırımın beklenen geri dönüş oranı piyasa faiz oranları ile karşılaştırılmıştır. Elektrikli otobüslerin uzun vadeli ekonomik faydalarının analiz edilmesi amacıyla farklı iskonto oranları kullanılarak duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş, piyasa koşullarındaki olası değişimlerin yatırım kararları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elektrik fiyatlarının artışı, batarya maliyetlerindeki değişimler ve karbon emisyonlarına yönelik küresel politika değişikliklerinin model üzerindeki etkileri incelenerek, yatırımın ekonomik riskleri belirlenmiştir.

Bu sürecin sonunda, Antalya ili için düşük karbonlu toplu taşıma sistemlerine geçişin ekonomik uygulanabilirliği kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiş ve karar vericiler için bilimsel bir yol haritası oluşturulmuştur. Elektrikli otobüslere geçişin yalnızca ekonomik bir yatırım olarak değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve toplumsal refah açısından da önemli kazanımlar sağlayacağı ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, yerel yönetimler ve politika yapıcılar için düşük karbonlu ulaşım politikalarının oluşturulmasına yönelik somut veriler sunmuş, böylece Antalya gibi hızla büyüyen şehirlerde sürdürülebilir hareketliliği teşvik eden stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlanmıştır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, Antalya ili toplu taşıma sisteminde düşük karbonlu teknolojilere geçişin ekonomik, çevresel ve sosyal etkilerine ilişkin analiz sonuçları detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Araştırmanın bulguları, mevcut durum analizinden başlayarak alternatif teknolojilerin değerlendirilmesi ve fayda-maliyet analizinin sonuçlarına kadar geniş bir spektrumda sunulmaktadır. Bu kapsamda, Antalya'nın mevcut toplu taşıma altyapısının kapasitesi, araç filosunun teknolojik özellikleri ve sistemin çevresel etkileri sistematik olarak incelenmiş, ardından düşük karbonlu alternatiflerin performans karakteristikleri karşılaştırmalı bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedefleri doğrultusunda Antalya özelinde geliştirilecek politika önerilerinin bilimsel temelini oluşturmaktadır.

4.1. Antalya İli Toplu Taşıma Sisteminin Mevcut Durum Analizi

Antalya ili toplu taşıma sisteminin mevcut durumunun analizi, düşük karbonlu teknolojilere geçiş sürecinin planlanması açısından kritik bir başlangıç noktası oluşturmaktadır. Bu analiz, hem mevcut sistemin kapasitesini ve sınırlılıklarını anlamak hem de gelecekteki dönüşüm senaryolarının gerçekçi bir zemine oturtulması için gerekli veri tabanını sağlamaktadır. Antalya'nın hızla büyüyen nüfusu, yoğun turizm faaliyetleri ve coğrafi yapısından kaynaklanan özel koşullar, şehrin ulaşım altyapısının kendine özgü dinamiklerini şekillendirmektedir. Bu bağlamda, mevcut toplu taşıma sisteminin altyapı kapasitesi, araç filosunun teknolojik özellikleri, yolcu talep profilleri ve sistemin çevresel etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi, gelecekteki politika kararlarının bilimsel verilerle desteklenmesi açısından önem taşımaktadır.

4.1.1. Toplu taşıma altyapısı ve araç filosunun özellikleri

Antalya ili, Türkiye'nin güney sahilinde yer alan ve turizm potansiyeliyle öne çıkan bir metropol olup, hızla artan nüfusu ve turistik faaliyetlerin yoğunluğu nedeniyle etkin bir toplu taşıma altyapısına ihtiyaç duymaktadır. Antalya'nın toplu taşıma sistemi, kara ve raylı sistemler olmak üzere iki ana kategoride incelenmektedir.

Antalya'da kara taşıma sistemleri, belediye otobüsleri, özel halk otobüsleri, minibüsler ve taksilerden oluşmaktadır. Belediye otobüsleri, Antalya Büyükşehir Belediyesi tarafından işletilmekte olup, kentin ana arterlerinde ve yoğun nüfuslu bölgelerinde hizmet vermektedir. Bu otobüsler, modern donanımları ve engelli erişimine uygun yapılarıyla dikkat çekmektedir. Özel halk otobüsleri ise özel sektör tarafından işletilmekte olup, belediye denetiminde çalışmaktadır. Bu otobüsler, genellikle belediye otobüslerinin ulaşamadığı bölgelere sefer düzenlemekte ve toplu taşıma ağının genişlemesine katkı sağlamaktadır. Minibüsler, özellikle kentin ara sokaklarında ve dar yollarında hizmet vererek, otobüslerin giremediği bölgelere ulaşım imkanı sunmaktadır. Antalya'da minibüsler, 6 adet depolama yeri ile toplam 58 hat üzerinde, 633 araç ile hizmet vermektedir (Tezcan ve Ergün, 2005). Taksiler ise bireysel ulaşım ihtiyacını karşılamakta olup, kentin farklı noktalarında kolaylıkla erişilebilmektedir.

Antalya'nın raylı sistem altyapısı, modern tramvay hatları ve nostaljik tramvay hattından oluşmaktadır. Modern tramvay hattı, Antray adıyla bilinmekte olup, ilk olarak Aralık 2009'da hizmete girmiştir. Bu hat, kentin kuzeyinden başlayarak şehir merkezine kadar uzanan çift hatlı bir sistemdir ve toplamda 16 duraktan oluşmaktadır. Duraklar sırasıyla; Fatih, Kepezaltı, Ferrokrom, Vakıf Çiftliği, Otogar, Pil Fabrikası, Dokuma, Çallı, Emniyet, Sigorta, Şarampol, Muratpaşa, İsmetpaşa, Doğu Garajı, Burhanettin Onat ve Meydan'dır. 2015 yılında, hattın havaalanı, Aksu ve Expo 2016'ya uzatılması için Ulaştırma Bakanlığı tarafından yapılan ihale Makyol firmasına verilmiştir. Proje, 450 gün içinde tamamlanması planlanmış olup, Aralık 2016'da bitirilmesi öngörülmüştür. Ancak, test sürüşleri 23 Nisan 2016'da başlamış ve orijinal takvimden yaklaşık 300 gün önce tamamlanmıştır. Meydan'dan Expo 2016'ya uzanan 15,4 kilometrelik bu genişleme, havaalanına 2,4 kilometrelik bir dal ile bağlanmış ve 15 duraktan oluşmaktadır. Yeni tramvay durakları sırasıyla; Kışla, Topçular, Demokrasi, Cırnık, Altınova, Yenigöl, Sinan, Yonca Kavşak, (Havalimanı), Pınarlı ANFAŞ, Kurşunlu, Aksu-1, Aksu-2, Aksu-3 ve EXPO'dur. 11 Ağustos 2019'da, Varsak'tan Atatürk'e uzanan 8,5 kilometrelik ikinci bir hafif raylı sistem hattı açılmıştır. Bu hat, 25 Ekim 2021'de Müze istasyonuna kadar 6,5 kilometre daha uzatılmıştır. Toplamda yaklaşık 15 kilometre uzunluğundaki bu hat, otogar, Akdeniz Üniversitesi Hastanesi, Araştırma Hastanesi ve Antalya Müzesi gibi önemli noktalara hizmet vermektedir. Antalya'da ayrıca 1999 yılında açılan 4,7 kilometre uzunluğunda

tek hatlı bir nostaljik tramvay hattı bulunmaktadır. Bu hat, Antalya Müzesi'nden başlayarak ana bulvar boyunca şehir merkezindeki Kale Kapısı, Hadrian Kapısı ve Karaalioğlu Parkı'ndan geçerek doğuda Lara Plajı yolunda sona ermektedir. Duraklar sırasıyla; Müze, Barbaros, Meslek Lisesi, Selekler, Cumhuriyet Meydanı, Kale Kapısı, Üç Kapılar, Büyükşehir Belediyesi, Işıklar ve Zerdalilik'tir (Antalya Ulaşım, 2025).

Antalya'nın toplu taşıma araç filosu, kara ve raylı sistemlerde kullanılan çeşitli araçlardan oluşmaktadır. Belediye otobüsleri ve özel halk otobüsleri, genellikle dizel yakıtlı olup, son yıllarda çevre dostu yakıt teknolojilerine geçiş çalışmaları sürdürülmektedir. Minibüsler ise daha küçük kapasitelidir ve genellikle kısa mesafeli yolculuklar için tercih edilmektedir. Raylı sistemlerde ise Antray hattında kullanılan modern tramvay araçları, 2009 yılında CAF tarafından tedarik edilen 14 adet beş modüllü %100 alçak tabanlı Urbos 2 tramvaylarından oluşmaktadır. 2015 yılında, hattın genişletilmesi nedeniyle, Güney Koreli Hyundai Rotem ve Türk şirketi Tüvasaş'ın ortak girişimi olan Eurotem'den 18 yeni tramvay siparişi verilmiştir. Bu araçlar 2016 yılında teslim edilmiştir. Ayrıca, 2022 ve 2024 yıllarında toplam 15 adet Bozankaya tramvayı da filoya eklenmiştir. Nostaljik tramvay hattında ise 1950-60'lı yıllardan kalma, Nürnberg'den temin edilen MAN ve Duewag marka tramvaylar kullanılmaktadır. Bu hat, hem yerli halk hem de turistler için tarihi bir deneyim sunmaktadır (Antalya Belediyesi, 2025b).

Antalya Büyükşehir Belediyesi'nin toplu taşıma araç filosu, modern kentsel hareketlilik gereksinimlerine uygun olarak tasarlanmış ve sürekli geliştirilmekte olan bir yapıya sahiptir. Mevcut araç filosu, şehrin zorlu iklim koşullarına uyum sağlamak amacıyla gelişmiş iklimlendirme ve havalandırma sistemleriyle donatılmış olup, yüksek sıcaklıklarda da konforlu bir yolculuk deneyimi sunmayı hedeflemektedir. Belediye yönetimi, özellikle yüksek ısıya karşı dayanıklılık gösterebilecek özel ve kamu toplu taşıma filolarının yenilenmesi konusunda stratejik adımlar atmakta ve bu kapsamda çevre dostu teknolojilerin entegrasyonuna öncelik vermektedir. Araç filosunun teknolojik modernizasyonu sürecinde, yüzey ısını düşüren "serin kaplama" malzemelerinin kullanılması gibi yenilikçi çözümler benimsenmiş ve iklim koşullarına uygun düzenlemeler hayata geçirilmektedir. Bu yaklaşım, hem yolcu konforunu artırmakta hem de araçların enerji verimliliğini yükselterek operasyonel maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Raylı sistem araç filosunun genişletilmesi için

yaklaşık 1,05 milyar TL'lik yatırım planlanması, Antalya'nın toplu taşıma kapasitesini artırma ve daha sürdürülebilir ulaşım alternatifleri sunma konusundaki kararlılığını ortaya koymaktadır (Antalya Belediyesi, 2025a). Genel olarak değerlendirildiğinde, mevcut araç filosu modern teknolojik altyapıya sahip olmakla birlikte, düşük karbonlu teknolojilere geçiş sürecinde daha kapsamlı bir dönüşüm gereksinimi bulunmaktadır.

4.1.2. Ulaşım talebi ve yolcu profil analizi

Antalya, Türkiye'nin güney sahilinde yer alan ve turizm potansiyeliyle öne çıkan bir metropol olup, hızla artan nüfusu ve turistik faaliyetlerin yoğunluğu nedeniyle karmaşık ve dinamik bir ulaşım talebine sahiptir. 2024 yılında, Antalya Havalimanı'nda toplam 39 milyon 230 bin 733 yolcuya hizmet verilmiş, bu da şehrin turizm sektöründeki önemini ve ulaşım altyapısının kapasitesini göstermektedir (Devlet Havayolları Müdürlüğü, 2025). Bu yoğun yolcu trafiği, şehrin ulaşım altyapısı üzerinde önemli bir baskı oluşturmakta ve toplu taşıma sisteminin etkinliğini doğrudan etkilemektedir.

Antalya'nın yerleşik nüfusu, 2022 yılı itibarıyla yaklaşık 2 milyon kişiye ulaşmıştır (TÜİK, 2024). Bu nüfus, yaz aylarında turizm sezonunun zirve yapmasıyla birlikte önemli ölçüde artmakta, bu da ulaşım talebinde mevsimsel dalgalanmalara yol açmaktadır. Özellikle yaz aylarında, toplu taşıma araçlarının kapasitesi zorlanmakta ve ek seferler düzenlenmesi gerekmektedir. Bu durum, hem yerel halkın hem de turistlerin ulaşım ihtiyaçlarının karşılanmasında zorluklar yaratmaktadır.

Antalya'nın toplu taşıma sistemi, belediye otobüsleri, özel halk otobüsleri, minibüsler ve tramvay hatlarından oluşmaktadır. Belediye otobüsleri ve özel halk otobüsleri, şehrin ana arterlerinde ve yoğun nüfuslu bölgelerinde hizmet vermekte olup, günlük ortalama 500 bin yolcu taşımaktadır (Antalya Belediyesi, 2025c). Minibüsler ise özellikle ara sokaklarda ve dar yollarında hizmet vererek, otobüslerin giremediği bölgelere ulaşım imkanı sunmaktadır. Tramvay hatları ise şehir merkezini havaalanı, otogar ve önemli turistik bölgelerle bağlamakta olup, günlük ortalama 100 bin yolcu taşımaktadır.

Yolcu profili incelendiğinde, toplu taşıma kullanıcılarının demografik özelliklerinde çeşitlilik gözlenmektedir. Yerel halkın yanı sıra, turistler de toplu taşıma sistemini yoğun bir şekilde kullanmaktadır. Turistlerin büyük bir kısmı, şehir içi ulaşımında toplu taşıma araçlarını tercih etmekte, bu da toplu taşıma sisteminin uluslararası standartlara uygunluğunu ve çok dilli bilgilendirme sistemlerinin önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca, öğrenci nüfusu da toplu taşımanın önemli bir kullanıcıdır. Antalya'da bulunan Akdeniz Üniversitesi ve diğer eğitim kurumları, öğrenci nüfusunun toplu taşıma talebini artırmaktadır.

Ulaşım talebi, günün belirli saatlerinde yoğunlaşmakta, özellikle sabah ve akşam saatlerinde pik seviyelere ulaşmaktadır. Bu durum, toplu taşıma araçlarında yoğunluğa ve bekleme sürelerinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, turizm sezonunda bu yoğunluk daha da artmakta, bu da toplu taşıma sisteminin esnekliğini ve kapasitesini zorlamaktadır. Antalya ili toplu taşıma sisteminin ulaşım talebi ve yolcu profili, şehrin demografik yapısı, turizm dinamikleri ve kentsel gelişim süreçleri tarafından şekillenmektedir. Türkiye'nin toplu taşıma yatırım kriterlerine göre, kent içi ulaşım sistemlerinde öncelikle otobüs, metrobüs ve trolleybüs gibi esnek kapasite sistemlerin tercih edilmesi, bunların yetersiz kaldığı durumlarda ise raylı sistem alternatiflerinin devreye alınması öngörülmektedir. Bu yaklaşım çerçevesinde, Antalya'nın mevcut ulaşım talep profili incelendiğinde, farklı koridor ve zaman dilimlerinde değişen yoğunluk seviyeleri gözlemlenmektedir. Raylı sistem kriterlerine göre, tramvay sistemleri için doruk saat-tek yön kesit yolculuk talebinin asgari 7.000 yolcu/saat, hafif raylı sistemler için 10.000 yolcu/saat ve metro sistemleri için 15.000 yolcu/saat düzeyine ulaşması gerekmektedir. Antalya'nın merkezi koridorlarında özellikle turizm sezonunda bu eşik değerlerin aşıldığı gözlemlenmekte, bu durum raylı sistem yatırımlarının gerekçelerini güçlendirmektedir. Şehrin yolcu profili analizi yapıldığında, yerli halkın düzenli işe gidiş-dönüş hareketliliği ile turistlerin sezonsal ve rekreasyonel ulaşım taleplerinin bir arada bulunduğu hibrit bir yapı ortaya çıkmaktadır (Antalya Belediyesi, 2025a).

Antalya Büyükşehir Belediyesi, toplu taşıma sisteminin etkinliğini artırmak ve ulaşım talebini karşılamak için çeşitli stratejiler geliştirmektedir. Bunlar arasında, yeni otobüs hatlarının açılması, mevcut hatların güzergahlarının optimize edilmesi, tramvay hatlarının genişletilmesi ve toplu taşıma araçlarının modernizasyonu bulunmaktadır.

Ayrıca, akıllı ulaşım sistemlerinin entegrasyonu ile toplu taşıma hizmetlerinin kalitesinin artırılması hedeflenmektedir.

4.1.3. Mevcut sistemin karbon emisyonları ve çevresel etkiler

Antalya, Türkiye'nin güney sahilinde konumlanan ve özellikle turizm sektörü ile öne çıkan büyük bir metropol olması nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Kentleşme hızının artışı, sanayi faaliyetlerinin yoğunlaşması, ulaşım sistemlerinin genişlemesi ve enerji tüketiminin sürekli olarak yükselmesi, Antalya'nın çevresel yükünü ve karbon ayak izini artıran temel faktörler arasında yer almaktadır. Karbon emisyonlarının başlıca kaynağını enerji sektörü, ulaşım faaliyetleri, sanayi üretimi ve atık yönetimi oluşturmaktadır. İklim değişikliği ile doğrudan ilişkili olan karbon emisyonları, Antalya'nın mevcut ve gelecekteki çevresel sürdürülebilirliğini tehdit eden en büyük etkenlerden biri olup, bu şehir için hava kirliliği, biyolojik çeşitlilik kaybı, ekosistem değişiklikleri, sıcaklık artışları ve su kaynaklarının azalması gibi çeşitli riskleri beraberinde getirmektedir.

Antalya'nın karbon emisyonlarının analizi, farklı sektörlerin sera gazı salımına değişen oranlarda katkı sunduğunu göstermektedir. 2019 yılı itibarıyla Antalya'nın sanayi sektörü hariç toplam sera gazı emisyonu 8.232.991 ton CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmış olup, bu dönemde kişi başına düşen emisyon miktarı 3,28 ton CO₂ eşdeğerine ulaşmıştır (Antalya Belediyesi, 2025c). Sanayi sektörünün de eklenmesiyle, bu değer 4,25 ton CO₂ eşdeğerine yükselmiş, ancak yine de Türkiye ortalaması olan 6,1 ton CO₂ eşdeğerinin altında kalmıştır. Ancak, bu rakamlar Antalya'nın uzun vadeli çevresel sürdürülebilirliği açısından ciddi riskler taşımaktadır. Şehrin ekonomik yapısının büyük ölçüde turizme dayanması, karbon emisyonlarında mevsimsel dalgalanmaları artırmakta, özellikle yaz aylarında enerji tüketiminin yoğunlaşmasına, konaklama tesislerinde yüksek elektrik talebine ve ulaşımında fosil yakıt kullanımına bağlı olarak karbon salınımının önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır. Turizm sezonunda artan yolcu taşımacılığı, havalimanı trafiği ve bireysel araç kullanımındaki yoğunluk, karbon emisyonlarını doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir. Ayrıca, Antalya'da enerji üretimi ve tüketiminin artan şehirleşme, sanayi büyümesi ve ulaşım talepleri doğrultusunda yükseldiği gözlemlenmektedir. Fosil yakıtlara dayalı enerji kullanımı, şehirdeki emisyon seviyelerini belirleyen en

önemli unsurlardan biri olmaya devam etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, enerji verimliliği politikalarının benimsenmesi ve sanayi süreçlerinde düşük karbonlu üretim teknolojilerine geçiş, Antalya'nın uzun vadeli emisyon azaltım hedefleri için kritik öneme sahiptir.

Antalya'da karbon emisyonlarının en büyük kaynağı enerji sektörüdür ve bu alan, fosil yakıtların kullanımına dayalı olarak hızla büyüyen bir emisyon kaynağıdır. Türkiye genelinde enerji sektörü kaynaklı emisyonlar, 2021 yılında 402,5 milyon ton CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmış ve 1990 yılına kıyasla %188,4 oranında artış göstermiştir (Ece Çokmutlu ve Özen, 2023). Antalya özelinde ise, enerji tüketiminin sanayi, ulaşım, ticaret ve konutlarda hızla artması karbon emisyonlarının sürekli yükselmesine neden olmaktadır. Özellikle turizm sektörünün gerektirdiği yüksek enerji talebi, elektrik üretiminde fosil yakıt kullanımının devam etmesi ve merkezi enerji sistemlerinin yoğunlaşması, karbon salınımını artıran temel etmenler arasındadır. Kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlar halen elektrik üretiminde ve sanayi tesislerinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu durum, sera gazı emisyonlarının Antalya'nın iklim politikaları doğrultusunda azaltılmasını zorlaştırmaktadır. Elektrik tüketiminin büyük oranda fosil yakıtlara bağlı olması, kentteki hava kalitesinin düşmesine, karbon ayak izinin artmasına ve uzun vadede çevresel tahribatın hızlanmasına yol açmaktadır. Alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim, Antalya'nın karbon emisyonlarını azaltmada en etkili stratejilerden biri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle güneş ve rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan Antalya'da, yenilenebilir enerji yatırımları hızlandırılmalı, kamu binalarında ve turizm tesislerinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik projeler teşvik edilmelidir. Ayrıca, merkezi enerji sistemlerinde dönüşüm sağlanarak, düşük karbonlu enerji üretim modelleri benimsenmeli ve sanayi tesisleri için yeşil enerjiye dayalı üretim süreçleri teşvik edilmelidir. Fosil yakıt kullanımının kademeli olarak azaltılması, karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin entegrasyonu, düşük karbonlu enerji üretimi için finansal teşviklerin sağlanması gibi adımlar, Antalya'nın enerji kaynaklı karbon emisyonlarını düşürmek için kritik öneme sahiptir. Enerji arz güvenliğini sağlayacak uzun vadeli sürdürülebilir planlar geliştirilmeli, konut ve ticari alanlarda enerji tüketimini azaltacak politikalar uygulanmalı ve toplumsal farkındalığın artırılması için eğitim programları yürütülmelidir. Enerji sektöründeki bu dönüşüm, yalnızca karbon

emisyollarını azaltmakla kalmayıp, Antalya'nın sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasını da hızlandıracaktır.

Ulaşım sektörü, Antalya'daki karbon emisyonlarının en büyük kaynaklarından biri olup, şehrin ekonomik ve demografik yapısına bağılı olarak giderek artan bir çevresel tehdit oluşturmaktadır. Özellikle turizm sezonlarında yoğun bir şekilde artan ulaşım talebi, bireysel araç kullanımının yaygınlaşması ve toplu taşıma sistemlerinde yaşanan kapasite sorunları, kentteki sera gazı emisyonlarının yükselmesine yol açmaktadır. 2010 yılında karayolu ulaşımından kaynaklanan CO₂ emisyonları 2.187,77 Gg (gigagram) olarak hesaplanırken, 2022 yılına gelindiğinde bu miktar %53,06 oranında artarak 3.348,51 Gg seviyesine ulaşmıştır (Antalya Belediyesi, 2025a). Bu artışın başlıca nedenleri arasında, araç sayısındaki hızlı artış, bireysel otomobil kullanımına olan bağımlılığın devam etmesi, toplu taşıma ağının yeterince geliştirilmemesi ve turistik faaliyetlerin her yıl daha fazla ziyaretçiye hizmet vermesi bulunmaktadır. Şehir içinde motorlu taşıt kullanımının artması, karbon emisyonlarının yükselmesine neden olan temel etkenlerden biri olmakla birlikte, trafik sıkışıklıkları ve düzensiz ulaşım planlaması da sera gazı salımını doğrudan etkileyen faktörler arasındadır. Ayrıca, Antalya'nın uluslararası bir turizm merkezi olması nedeniyle havayolu taşımacılığı da şehirdeki karbon salımına büyük katkıda bulunmaktadır. Antalya Havalimanı'nda her yıl milyonlarca yolcu ağırlanmakta ve uçuş trafiği her geçen yıl artış göstermektedir. Bu durum, uçaklardan kaynaklanan karbon emisyonlarının da şehirdeki toplam sera gazı salımına önemli ölçüde katkı sunduğunu göstermektedir. Antalya'nın ulaşım kaynaklı karbon emisyonlarını azaltmak için toplu taşıma sistemlerinin güçlendirilmesi, raylı sistemlerin yaygınlaştırılması, bisiklet yollarının artırılması ve yaya dostu ulaşım planlamalarının geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Elektrikli otobüslerin ve hibrit araçların kullanımının teşvik edilmesi, fosil yakıt kullanımının azaltılması ve alternatif yakıt teknolojilerine geçişin hızlandırılması, şehrin çevresel sürdürülebilirliğine katkı sağlayacaktır. Ayrıca, akıllı ulaşım sistemlerinin entegrasyonu ile trafik yoğunluğu daha verimli bir şekilde yönetilebilir ve karbon salımı minimum seviyeye indirilebilir. Antalya Büyükşehir Belediyesi tarafından geliştirilen çevreci ulaşım politikaları, karbon emisyonlarını azaltma sürecinde önemli bir araç olarak değerlendirilmekte olup, kapsamlı kentsel hareketlilik planları ile emisyonların kontrol altına alınması hedeflenmektedir. Kentin ulaşım altyapısının daha sürdürülebilir hale getirilmesi için toplu taşıma yatırımlarının artırılması, bireysel

araç kullanımını azaltacak teşviklerin uygulanması ve çevreci ulaşım çözümlerinin benimsenmesi gerekmektedir. Gelecekte, Antalya'nın karbon emisyonlarının azaltılması ve ulaşım sistemlerinin çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda yeniden şekillendirilmesi, kent yaşam kalitesinin artırılmasına da önemli katkılar sağlayacaktır.

Atık yönetimi ve bertaraf sistemleri, Antalya'nın karbon emisyonları üzerindeki etkisi açısından kritik bir role sahiptir. Şehirde hızla artan nüfus ve turizm faaliyetleri, atık miktarının sürekli olarak yükselmesine neden olmakta ve sürdürülebilir atık yönetim politikalarının uygulanmasını zorunlu hale getirmektedir. Antalya'da evsel atıklar, sanayi atıkları, tarımsal atıklar ve tehlikeli atıklar gibi farklı kategorilerde atık yönetimi süreçleri yürütülmektedir. Ancak, bu süreçlerin verimli bir şekilde yönetilmemesi, sera gazı emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır. Özellikle organik atıkların çöp sahalarında çürüyerek metan (CH₄) gazı salmasına yol açması, Antalya'nın karbon ayak izini önemli ölçüde artırmaktadır. Metan, karbondioksit göre yaklaşık 25 kat daha yüksek bir küresel ısınma potansiyeline sahip olduğundan, atık yönetiminde sürdürülebilir yöntemlerin benimsenmesi büyük önem taşımaktadır. Antalya'daki mevcut atık yönetim sistemleri, atıkların düzenli depolama sahalarında toplanması, geri dönüşüm tesislerinde değerlendirilmesi, organik atıkların kompostlama yoluyla dönüştürülmesi ve atık enerji tesislerinde enerjiye dönüştürülmesi gibi çeşitli aşamalardan oluşmaktadır. Ancak, bu sistemlerde yaşanan altyapı eksiklikleri, atık ayrıştırma süreçlerinin yetersiz olması ve geri dönüşüm oranlarının düşük kalması gibi faktörler, karbon emisyonlarını azaltma çabalarını olumsuz etkilemektedir. Özellikle plastik, cam, metal ve kağıt gibi geri dönüştürülebilir malzemelerin etkin bir şekilde toplanarak geri dönüşüm oranlarının artırılması, Antalya'nın çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında önemli bir adımdır. Antalya'da belediyeler tarafından yürütülen geri dönüşüm projeleri ve sıfır atık uygulamaları, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Ancak, geri dönüşüm oranlarının artırılması için daha kapsamlı ve entegre bir atık yönetim politikası gerekmektedir. Katı atık depolama sahalarının modernize edilmesi, metan gazı salınımının kontrol altına alınması için gaz toplama ve enerji üretimi sistemlerinin kurulması, Antalya'nın karbon salımını azaltmada etkili olabilecek stratejiler arasındadır. Avrupa ve dünya genelinde birçok şehirde uygulanan atıktan enerji üretimi tesislerinin Antalya'da yaygınlaştırılması, şehirdeki katı atıkların

değerlendirilmesi açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Atık yönetiminde sürdürülebilir bir yaklaşımla hareket edilmesi, karbon emisyonlarının azaltılmasının yanı sıra ekolojik dengeyi koruma açısından da büyük bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Antalya'nın atık yönetimi politikalarının daha etkin hale getirilmesi için toplumun geri dönüşüm konusunda bilinçlendirilmesi, atık ayrıştırma süreçlerinin yaygınlaştırılması ve atık toplama sistemlerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Turistik faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde geri dönüşüm ünitelerinin artırılması, oteller ve büyük işletmeler için atık azaltma politikalarının zorunlu hale getirilmesi gibi önlemler, karbon salımını azaltma çabalarına katkıda bulunabilir. Ayrıca, biyobozunur atıkların anaerobik çürütme teknolojileri ile enerjiye dönüştürülmesi gibi yenilikçi yaklaşımlar benimsenerek Antalya'nın atık yönetim sistemi daha sürdürülebilir hale getirilebilir. Tüm bu adımlar, şehrin karbon emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlarken, aynı zamanda Antalya'nın çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına yardımcı olacaktır.

Antalya'nın doğal ormanları, kent ekosisteminin en önemli karbon dengeleme unsurlarından biri olup, bölgenin çevresel sürdürülebilirliğine katkı sağlayan kritik ekosistemler arasında yer almaktadır. Ormanlar, fotosentez yoluyla atmosferdeki karbonu emerek sera gazlarının azaltılmasına doğrudan katkıda bulunmakta, böylece küresel ısınmanın etkilerini hafifletici bir rol üstlenmektedir. Ormanların karbon tutma kapasitesi, ağaçların yaşına, türüne, toprak yapısına ve ekosistem içindeki biyolojik çeşitliliğe bağlı olarak değişmekte olup, özellikle geniş yapraklı ve iğne yapraklı ormanların bulunduğu Antalya gibi bölgelerde bu kapasite oldukça yüksektir. Ancak, kentleşmenin hızlanması, tarım alanlarının genişlemesi ve turizm altyapısının büyümesi gibi faktörler, orman ekosistemlerini tehdit etmekte ve karbon tutma potansiyelinin azalmasına yol açmaktadır. Özellikle Antalya'nın kıyı şeridinde ve kırsal bölgelerinde artan yapılaşma, doğal habitat kayıplarını artırarak bölgenin karbon dengesi üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Son yıllarda, Antalya'da yaşanan orman yangınları, karbon emisyonlarını ciddi şekilde artıran doğal felaketler arasında yer almaktadır. Orman yangınları sırasında büyük miktarda karbon doğrudan atmosfere salınmakta, yangın sonrası bozulmuş orman alanları ise karbon emme kapasitesini kaybetmektedir. Yangın sonrası yeniden ağaçlandırma çalışmaları yapılırsa bile, olgun bir ormanın karbon dengeleme işlevini geri kazanması onlarca yıl sürebilmektedir. Bu nedenle, orman yangınlarını önleyici tedbirlerin alınması, erken

uyarı sistemlerinin geliştirilmesi ve yangına dayanıklı orman ekosistemlerinin oluşturulması, Antalya'nın karbon emisyonlarını azaltma hedefleri açısından büyük önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, şehir içinde ve çevresinde yeşil alanların artırılması, karbon emisyonlarının denetlenmesi ve hava kalitesinin iyileştirilmesi açısından önemli bir stratejidir. Kent içindeki parklar, ağaçlandırılmış caddeler, doğal yaşam koridorları ve yeşil çatı projeleri, karbon salınımını dengeleme ve kentsel ısı adası etkisini azaltma noktasında kilit rol oynamaktadır. Antalya Büyükşehir Belediyesi ve yerel yönetimler tarafından yürütülen yeşil altyapı projelerinin daha da yaygınlaştırılması, şehir genelinde biyolojik çeşitliliğin korunmasını sağlayarak ekosistem dengesinin sürdürülebilirliğini artıracaktır. Antalya'da orman varlığını koruma ve artırma adına atılması gereken bir diğer önemli adım da sürdürülebilir ormancılık politikalarının geliştirilmesidir. Orman yönetimi kapsamında, orman alanlarının korunması, rehabilitasyonu ve sürdürülebilir kesim politikalarının uygulanması gerekmektedir. Ayrıca, ormansızlaşmanın önüne geçmek amacıyla kamu ve özel sektör iş birliğiyle yeni ağaçlandırma projeleri hayata geçirilmeli, orman ekosistemleri üzerinde olumsuz etkiye sahip olan madencilik, tarım ve turizm faaliyetleri sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda yeniden ele alınmalıdır.

Antalya'da artan karbon emisyonları, bölgenin çevresel sürdürülebilirliği açısından kritik tehditler oluşturmaktadır. Bu durum, kentin ekolojik dengesi üzerinde uzun vadeli olumsuz etkiler yaratmakta ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerini sekteye uğratmaktadır. Küresel ısınmanın tetiklediği iklim değişiklikleri, sıcaklık artışlarına, yağış rejimlerinin düzensizleşmesine ve aşırı hava olaylarının sıklıkla yaşanmasına yol açmaktadır. Antalya gibi Akdeniz ikliminin hâkim olduğu bölgelerde bu değişiklikler, kuraklık, su kıtlığı ve ekosistemlerin bozulması gibi ciddi sonuçlar doğurmaktadır. Deniz seviyesinin yükselmesi, kıyı bölgelerindeki ekosistemler için büyük bir tehdit oluşturmakta, özellikle turistik ve tarımsal alanlarda toprak kayıplarına ve tuzlanmaya neden olmaktadır. Bu durum, yeraltı su kaynaklarının azalması ve içme suyu rezervlerinin kirlenmesi gibi ekolojik sonuçlar yaratmaktadır. Karbon emisyonlarının artışı, hava kirliliğini tetikleyerek insan sağlığı üzerinde de doğrudan olumsuz etkiler yaratmaktadır. Özellikle partikül madde (PM10, PM2.5) ve azot oksit (NOx) gibi hava kirleticiler, solunum yolu hastalıklarının ve kardiyovasküler rahatsızlıkların yaygınlaşmasına neden olmaktadır (Antalya Tabip Odası, 2025). Bu tür kirleticilerin uzun süreli maruziyeti, akciğer fonksiyonlarının bozulmasına, astım gibi kronik

solunum hastalıklarının artmasına ve erken ölümlerin yükselmesine yol açmaktadır. Antalya gibi büyük şehirlerde, ulaşım ve sanayi kaynaklı hava kirliliği, halk sağlığı açısından ciddi riskler barındırmakta ve toplumun genel yaşam kalitesini düşürmektedir. Kentsel alanlarda hava kalitesinin sürekli olarak izlenmesi ve uluslararası standartlara uygun hava kirliliği yönetim politikalarının uygulanması büyük önem taşımaktadır. Karbon emisyonlarını azaltmak için çeşitli stratejilerin hayata geçirilmesi gerekmektedir. Öncelikle, enerji sektöründe yenilenebilir kaynakların daha geniş bir şekilde benimsenmesi, fosil yakıt kullanımının azaltılması ve enerji verimliliğini artıracak önlemlerin uygulanması gerekmektedir. Antalya'nın güneş enerjisi potansiyeli oldukça yüksek olup, bu potansiyelin etkin bir şekilde kullanılması karbon emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlayacaktır. Güneş panellerinin yaygınlaştırılması, özellikle turizm tesislerinde yenilenebilir enerjiye geçişin desteklenmesi ve kamu binalarında enerji verimli uygulamaların teşvik edilmesi gibi adımlar, kentin enerji dönüşümünü hızlandıracaktır. Ulaşım sistemlerinde sürdürülebilir çözümler geliştirilerek karbon emisyonlarının önemli bir kısmının önüne geçilebilir. Toplu taşıma altyapısının güçlendirilmesi, elektrikli otobüslerin kullanımının yaygınlaştırılması ve bisiklet yollarının artırılması, motorlu taşıt kaynaklı emisyonları azaltmada etkili stratejilerdir. Ayrıca, akıllı trafik yönetim sistemleri ile ulaşım da verimliliğin artırılması, yakıt tüketiminin azaltılmasına katkıda bulunacaktır. Antalya'da toplu taşıma sistemlerinin daha fazla tercih edilmesini sağlamak için kullanıcı dostu ulaşım politikalarının hayata geçirilmesi, hem karbon salınımının düşürülmesine hem de kent içinde ulaşımın daha verimli hale getirilmesine yardımcı olacaktır. Atık yönetimi, karbon emisyonlarının kontrol altına alınmasında kilit bir rol oynamaktadır. Özellikle organik atıkların metan gazı salımını artırdığı düşünüldüğünde, bu atıkların geri dönüştürülmesi ve enerjiye dönüştürülmesi büyük önem taşımaktadır. Antalya'da geri dönüşüm oranlarının artırılması, atık depolama sahalarındaki emisyonların azaltılması ve atık ayrıştırma politikalarının daha etkin hale getirilmesi, kentin sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerine katkı sağlayacaktır. Kompostlama ve biyogaz üretimi gibi yenilikçi atık yönetimi yaklaşımlarının desteklenmesi, hem çevresel sürdürülebilirliği artıracak hem de atık kaynaklı karbon salınımını azaltacaktır.

4.1.4. Yürürlükteki ulaşım politikalar ve stratejiler

Antalya Büyükşehir Belediyesi, küresel ölçekte giderek derinleşen iklim değişikliği sorununa karşı kapsamlı ve çok boyutlu sürdürülebilir politikalar geliştirme amacıyla çeşitli stratejiler benimsemektedir. Bu stratejiler, kentin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirmek ve karbon emisyonlarını azaltmak üzere uluslararası iş birlikleriyle entegre edilmiştir. Avrupa Belediye Başkanları Sözleşmesi'ne (Covenant of Mayors) 2013 yılında üye olunmasıyla birlikte, Antalya'nın düşük karbon ekonomisine geçiş süreci hızlanmış ve iklim değişikliğiyle mücadelede bilimsel ve stratejik politikalar temelinde somut adımlar atılmıştır. Bu kapsamda, 2021 yılında Sürdürülebilir Enerji Eylem Planı (SEEP) hazırlanmış olup, kent genelinde enerji verimliliğini artırma, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etme ve sera gazı emisyonlarını azaltma gibi hedefler belirlenmiştir. SEEP, Antalya'nın uzun vadeli çevresel sürdürülebilirlik stratejisini şekillendiren temel bir politika dokümanı olarak, kentsel altyapının yeşil dönüşümünü desteklemekte ve fosil yakıt bağımlılığını azaltmaya yönelik çeşitli projeler içermektedir. Antalya, artan enerji talebi ve çevresel baskılar nedeniyle, 2022 yılında Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planı'nı (SECAP) uygulamaya koyarak, iklim değişikliğiyle mücadelede daha kapsamlı bir yol haritası oluşturmuştur. SECAP kapsamında (2022), Antalya'nın 2030 yılına kadar karbon emisyonlarını %40 azaltması ve 2050 yılına kadar karbon nötr kent statüsüne ulaşması hedeflenmektedir. Bu plan, sadece karbon azaltımına yönelik değil, aynı zamanda iklim değişikliğinin kentsel yaşam, doğal ekosistemler ve altyapı üzerindeki etkilerini azaltmaya yönelik iklim uyum politikalarını da içermektedir. Tarım, peyzaj yönetimi, enerji sistemleri, ulaşım altyapısı, su kaynakları, deniz ekosistemleri ve kentsel hava kalitesi gibi çeşitli sektörleri kapsayan çok yönlü bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu doğrultuda, Antalya Büyükşehir Belediyesi, kent içindeki karbon salımını kontrol altına almak için mevcut durum analizleri yaparak kentsel ve kurumsal karbon ayak izi envanterlerini oluşturmuş, bu envanterler üzerinden hedef bazlı emisyon azaltım politikalarını belirlemiştir.

Fosil yakıt tüketimini aşamalı olarak azaltmak, yenilenebilir enerji yatırımlarını artırmak ve enerji verimliliği uygulamalarını yaygınlaştırmak, bu stratejilerin temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Enerji politikaları açısından değerlendirildiğinde, Antalya Büyükşehir Belediyesi'nin sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda

enerji verimliliğini teşvik eden projeler geliştirdiği görülmektedir. Kent genelindeki mevcut yapı stokunun enerji tüketimini optimize edecek şekilde modernize edilmesi, yeni yapıların düşük karbonlu teknolojilerle donatılması, kamu ve özel sektör binalarında fotovoltaik panellerin kullanımının artırılması gibi stratejiler uygulanmaktadır. Güneş enerjisi kullanımını artırmaya yönelik projelerin yanı sıra, elektrikli araçlar ve enerji tasarruflu altyapı yatırımları, Antalya'nın düşük karbon ekonomisine geçiş sürecinde önemli yer tutmaktadır. Kamu binalarının enerji verimliliğini artırmak için akıllı bina sistemlerinin yaygınlaştırılması ve sürdürülebilir aydınlatma sistemlerinin teşvik edilmesi, kentin enerji tüketimini düşürme noktasında kritik önem taşımaktadır. Büyükşehir Belediyesi, ulaşım sektöründeki karbon emisyonlarını azaltmak adına çeşitli adımlar atmaktadır. Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı çerçevesinde, kent içi ulaşımın çevresel etkilerini en aza indirmek için elektrikli otobüs filolarının artırılması, akıllı ulaşım sistemlerinin yaygınlaştırılması ve bisiklet kullanımının teşvik edilmesi gibi projeler hayata geçirilmektedir. Özellikle fosil yakıt tüketimini azaltmayı hedefleyen bu politikalar, ulaşım altyapısında düşük karbonlu alternatiflerin benimsenmesini sağlamaktadır. Elektrikli şarj istasyonlarının yaygınlaştırılması, şehir içinde yayalaştırılmış bölgelerin artırılması ve toplu taşımanın kullanım oranlarını yükseltecek stratejilerin uygulanması, Antalya'nın ulaşım kaynaklı emisyonlarını azaltmada etkili çözümler olarak değerlendirilmektedir. Akıllı trafik yönetim sistemleri sayesinde, trafik yoğunluğunun optimize edilmesi ve gereksiz yakıt tüketiminin önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Antalya Büyükşehir Belediyesi, ulusal ve uluslararası düzeyde sürdürülebilir kalkınma politikalarını entegre ederek, çeşitli iş birlikleri ve finansman mekanizmalarından yararlanmaktadır. Avrupa Birliği destekli projeler, çevresel finansman kuruluşları ile ortak girişimler ve yerel yönetimlerin iklim politikaları konusundaki rollerini artırmaya yönelik projeler, Antalya'nın sürdürülebilir şehir olma vizyonuna doğrudan katkı sağlamaktadır. Antalya Valiliği ile iş birliği içinde yürütülen projeler, iklim değişikliği ile mücadelede kentsel politikaların daha geniş ölçekli uyum süreçlerine entegre edilmesini kolaylaştırmaktadır. Kentin iklim değişikliğine karşı dayanıklılığını artırmak adına sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda akademik araştırmaların teşvik edilmesi ve üniversiteler ile ortak projeler geliştirilmesi, yerel düzeyde bilime dayalı çözümler üretilmesine katkı sunmaktadır.

Antalya Büyükşehir Belediyesi'nin sürdürülebilir kalkınma politikaları, karbon emisyonlarının azaltılması ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda şehrin iklim değişikliğine uyum sürecini hızlandırmak ve farklı sektörleri kapsayan geniş ölçekli yapısal dönüşümleri teşvik etmek üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çerçevede, SECAP kapsamında belirlenen eylemler, tarımsal üretim süreçlerinden kentsel peyzaj yönetimine, ulaşım altyapısının ekolojik etkilerinden enerji yönetim sistemlerinin verimliliğine, su kaynaklarının korunmasından deniz kirliliğinin önlenmesine kadar birçok alanda sürdürülebilir çözümleri içermektedir.

Antalya Büyükşehir Belediyesi, bu politikaların uygulanabilirliğini artırmak amacıyla kapsamlı karbon ayak izi envanter çalışmaları yaparak, emisyon kaynaklarını detaylı bir şekilde analiz etmekte ve elde edilen veriler doğrultusunda önleyici tedbirleri geliştirmektedir. Karbon emisyonlarının uzun vadeli azaltımında fosil yakıt kullanımının aşamalı olarak düşürülmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ve enerji verimliliği teknolojilerinin kamu ve özel sektörde teşvik edilmesi öncelikli hedefler arasında yer almaktadır. Bu kapsamda, enerji dönüşümünü hızlandırmak için binaların enerji tüketimini en aza indirecek şekilde dönüştürülmesi, yeni inşa edilen yapıların düşük karbon salınımı sağlayacak malzemelerle tasarlanması ve akıllı şehir uygulamalarının yaygınlaştırılması stratejik öneme sahiptir. Antalya'da kamu binalarına yönelik enerji tasarruflu sistemlerin entegrasyonu kapsamında, fotovoltaiik panellerin yaygınlaştırılması, akıllı aydınlatma çözümlerinin kullanılması ve ısı yalıtım teknolojilerinin standart hale getirilmesi gibi projeler ön plandadır. Özellikle, kamu hizmet binalarının net sıfır enerji ilkesine uygun şekilde tasarlanması ve mevcut yapı stokunun bu hedefe uyumlu hale getirilmesi, kentin sürdürülebilir enerji politikalarının temel taşlarından biri olarak görülmektedir. Bununla birlikte, ulaşım sektörünün karbon salınımındaki etkisini en aza indirmek amacıyla çok yönlü politikalar geliştirilmektedir.

Antalya Büyükşehir Belediyesi, sürdürülebilir kentsel hareketlilik politikalarını hayata geçirerek, kent içi ulaşımında fosil yakıt bağımlılığını azaltmak ve alternatif ulaşım modellerini yaygınlaştırmak için kapsamlı çalışmalar yürütmektedir. Elektrikli ve hibrit araçların teşvik edilmesi, şehir genelinde yaygın şarj istasyonları ağının oluşturulması ve toplu taşıma sistemlerinin çevre dostu hale getirilmesi bu süreçte öne çıkan uygulamalar arasındadır. Toplu taşımada elektrikli otobüs kullanımının

yaygınlaştırılması, bisiklet yollarının artırılması ve yaya dostu ulaşım politikalarının teşvik edilmesi, ulaşım sektöründeki karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik önemli adımlardır. Ayrıca, akıllı ulaşım sistemleri ve trafik yönetiminde dijital dönüşüm projeleri ile trafik yoğunluğunun optimize edilmesi ve böylece gereksiz yakıt tüketiminin önlenmesi hedeflenmektedir.

Antalya'nın enerji verimliliği ve sürdürülebilir kalkınma politikaları, aynı zamanda yeşil altyapı yatırımları ile desteklenmektedir. Kent genelinde yeşil koridorların oluşturulması, ekolojik peyzaj tasarımlarının benimsenmesi, su tasarrufu sağlayan sistemlerin teşvik edilmesi ve şehir içinde karbon tutma kapasitesine sahip alanların artırılması bu kapsamda ele alınmaktadır. Özellikle, doğal afet risklerine karşı dirençli ekosistemler yaratma hedefi doğrultusunda, sel baskınlarını önleyici altyapı projeleri ve sürdürülebilir drenaj sistemleri üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Antalya Büyükşehir Belediyesi, aynı zamanda su kaynaklarının korunması amacıyla akıllı sulama sistemlerinin yaygınlaştırılması, gri su geri dönüşümü projelerinin teşvik edilmesi ve su tasarrufunu artıran teknolojilerin kullanımını özendirilmektedir. Antalya'nın düşük karbon ekonomisine geçiş sürecinde ulusal ve uluslararası iş birlikleri büyük önem taşımaktadır. Avrupa Birliği tarafından desteklenen çevresel finansman projeleri, sürdürülebilir kalkınma fonları ve iklim değişikliği ile mücadele eden küresel ağlarla yapılan iş birlikleri, kent yönetiminin uzun vadeli çevresel hedeflerini gerçekleştirmesine katkı sağlamaktadır. Antalya Valiliği ve merkezi hükümet ile yapılan koordineli çalışmalar, kentin yeşil kalkınma projelerinin sürdürülebilirlik çerçevesinde ilerlemesini kolaylaştırmaktadır. Aynı zamanda, akademik iş birlikleri aracılığıyla bilim temelli çözümler geliştirilmekte, üniversiteler ile ortak araştırmalar yürütülerek yenilikçi çevre teknolojilerinin uygulanması desteklenmektedir.

Antalya Büyükşehir Belediyesi, ulaşım sektörünün neden olduğu karbon emisyonlarını azaltmak için kapsamlı ve yenilikçi politikalar geliştirmektedir. Kent içi ulaşımın çevresel etkilerini minimize etmek amacıyla yürütülen bu politikalar, toplu taşıma sistemlerinin modernizasyonu, elektrikli ve hibrit araçların yaygınlaştırılması, akıllı ulaşım sistemlerinin entegrasyonu ve kentsel hareketlilik planlamalarının çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri çerçevesinde yeniden düzenlenmesi gibi çok yönlü stratejileri içermektedir. Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı kapsamında, toplu

taşıma ağının genişletilmesi ve elektrikli otobüs filolarının artırılması gibi projeler öncelikli hale getirilmiştir. Ayrıca, kent içinde bisiklet kullanımını yaygınlaştırmak amacıyla bisiklet yollarının geliştirilmesi ve kullanıcı dostu akıllı bisiklet paylaşım sistemlerinin kurulması hedeflenmektedir. Bu kapsamda, sürdürülebilir ve çevre dostu ulaşım modellerinin yaygınlaştırılması, karbon salınımını düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda kent içi trafik yoğunluğunu azaltarak genel hava kalitesinin iyileştirilmesine de katkı sağlamaktadır. Elektrikli ve hibrit araçların kullanımını teşvik etmek için kent genelinde hızlı şarj istasyonları kurulmakta, fosil yakıtlı araçlardan kaynaklanan emisyonları azaltmaya yönelik teşvik politikaları hayata geçirilmektedir. Elektrikli araç altyapısının güçlendirilmesi ile birlikte, kent içi lojistik ve taşımacılık faaliyetlerinde de çevre dostu çözümler geliştirilmekte, ticari taşıma araçlarının düşük emisyonlu alternatiflere yönlendirilmesi desteklenmektedir. Şehir içi taşımacılığın çevresel etkilerini minimize etmek için yük taşımacılığı alanında akıllı lojistik yönetimi sistemlerinin uygulanması ve elektrikli hafif ticari araç kullanımının yaygınlaştırılması gibi projeler yürütülmektedir. Ayrıca, akıllı ulaşım sistemleri ile trafik yönetiminin iyileştirilmesi, gereksiz yakıt tüketiminin ve karbon salınımının önüne geçmek için önemli bir adım olarak görülmektedir.

Trafik yoğunluğunu azaltmaya yönelik akıllı sinyalizasyon sistemleri, araç güzergah optimizasyonu ve gerçek zamanlı toplu taşıma takip uygulamaları sayesinde, yolculuk sürelerinin kısaltılması ve ulaşımın daha verimli hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Bu teknolojiler, kent sakinlerinin daha çevre dostu ulaşım tercihlerine yönelmesini teşvik ederken, kentsel sürdürülebilirliği artıran bir ulaşım altyapısının oluşturulmasına katkı sunmaktadır. Antalya Büyükşehir Belediyesi, aynı zamanda yürünebilir kent anlayışını destekleyen projeler geliştirmekte, yaya ulaşımını teşvik eden kent içi düzenlemeler yapmaktadır. Yayalaştırılmış alanların artırılması, kaldırımların genişletilmesi ve yeşil yürüyüş koridorlarının oluşturulması, bireysel araç kullanımının azaltılmasını sağlayarak karbon emisyonlarının düşürülmesine katkıda bulunmaktadır. Bu stratejiler, ulaşım politikalarının yalnızca araç odaklı olmaktan çıkıp, insan ve çevre merkezli bir anlayışa dönüşmesini sağlamaktadır. Kent içi ulaşım politikalarının geliştirilmesi ve uygulanmasında, Antalya Büyükşehir Belediyesi, ulusal ve uluslararası düzeyde iş birlikleri yaparak çevresel sürdürülebilirliği destekleyen finansman kaynaklarından faydalanmaktadır.

Avrupa Birliği destekli projeler ve küresel çevresel fonlarla yürütölen sürdürülebilir ulaşım projeleri, Antalya'nın düşük karbon ekonomisine geçiş sürecini hızlandırmaktadır. Antalya Valiliği ve ilgili kamu kurumları ile yürütölen ortak çalışmalar, kentsel ulaşımın sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda yeniden şekillendirilmesini sağlamakta, aynı zamanda ulaşım planlamalarında çevresel ve sosyal faktörlerin daha fazla dikkate alınmasını mümkün kılmaktadır. Son olarak, belediye, akademik kurumlarla iş birliği yaparak sürdürülebilir ulaşım çözümleri geliştirilmesi ve iklim değişikliğiyle mücadelede yeni nesil ulaşım teknolojilerinin kullanılması için Ar-Ge projelerini desteklemektedir. Üniversitelerle gerçekleştirilen ortak araştırmalar, yenilikçi ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi ve kent içi karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik teknolojik çözümlerin uygulanmasını hızlandırmaktadır. Tüm bu adımlar, Antalya'nın ulaşım sisteminin daha çevreci, erişilebilir ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşmasına katkıda bulunmakta, kentin gelecekte düşük karbon emisyonlu bir şehir olma vizyonunu güçlendirmektedir.

4.2. Düşük Karbonlu Toplu Taşıma Teknolojilerinin Değerlendirilmesi

Antalya ili toplu taşıma sisteminde mevcut durum analizinin ardından, sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedefleri doğrultusunda değerlendirilebilecek düşük karbonlu teknoloji alternatifleri sistematik bir yaklaşımla incelenmektedir. Bu teknolojilerin her biri, farklı operasyonel koşullarda çeşitli avantajlar ve sınırlılıklar sunmakta olup, Antalya'nın kendine özgü coğrafi, iklimsel ve demografik özelliklerine uygunlukları açısından detaylı bir değerlendirmeye tabi tutulmaktadır. Elektrikli, hibrit ve alternatif yakıt teknolojilerinin performans karakteristikleri, maliyet yapıları ve çevresel etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilerek, şehrin toplu taşıma filosunun dönüşümü için en uygun teknolojik seçeneklerin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu değerlendirme süreci, hem teknik uygulanabilirlik hem de ekonomik sürdürülebilirlik kriterlerini dikkate alarak, Antalya özelinde gerçekleştirilebilecek düşük karbonlu dönüşüm senaryolarının bilimsel temelini oluşturmaktadır.

4.2.1. Tam elektrikli otobüs sistemleri

Elektrikli otobüsler, modern şehirlerde sürdürülebilir ulaşımın sağlanmasında kritik bir rol oynamakta olup, çevresel ve ekonomik avantajlarıyla geleneksel toplu taşıma

araçlarının yerini alma potansiyeline sahiptir. Günümüzde kentleşmenin hızlanması, ulaşım ağlarının genişlemesi ve fosil yakıt tüketiminin çevresel etkilerinin artması, elektrikli otobüsleri toplu taşıma sistemlerinde kaçınılmaz bir seçenek haline getirmiştir. Dizel yakıtlı otobüslerin yüksek karbon emisyonu, partikül madde salınımı ve gürültü kirliliği gibi olumsuzlukları, bu araçların kullanımını giderek daha fazla sorgulanan bir konu haline getirmektedir. Elektrikli otobüsler ise sıfır emisyon özelliği ile hava kalitesinin korunmasına, enerji verimliliğinin artırılmasına ve kent içi ulaşımında sürdürülebilir bir dönüşümün sağlanmasına büyük katkı sunmaktadır. Elektrikli otobüslerin kent içi ulaşım sistemlerine entegre edilmesi, hem çevresel hem de ekonomik açıdan büyük avantajlar sağlamaktadır. Öncelikle, bu araçların fosil yakıt tüketimi olmaması, belediyelerin uzun vadede yakıt maliyetlerinden tasarruf etmesine olanak tanımaktadır.

Türkiye'deki çeşitli şehirlerde yapılan araştırmalar, elektrikli otobüslerin dizel otobüslere kıyasla işletme maliyetlerinde %75'e varan düşüş sağladığını göstermektedir (Cengiz, 2021). Bununla birlikte, elektrikli otobüslerde içten yanmalı motora kıyasla daha az hareketli parça bulunduğundan, bakım maliyetleri de önemli ölçüde azalmaktadır. Geleneksel otobüslerde sıklıkla karşılaşılan motor aşınması, egzoz sistemi problemleri ve yağ değişimi gibi maliyet gerektiren unsurlar, elektrikli otobüslerde bulunmamaktadır. Bu faktörler, belediyeler ve özel toplu taşıma işletmeleri açısından uzun vadeli ekonomik kazanç sağlamaktadır.

Antalya Büyükşehir Belediyesi, şehir içi ulaşımın sürdürülebilirliğini artırmak ve toplu taşıma ağını modernize etmek amacıyla elektrikli otobüsleri toplu taşıma filosuna dahil etmeye başlamıştır. Bu bağlamda, özellikle Akdeniz Üniversitesi kampüsü gibi yüksek yolcu sirkülasyonuna sahip bölgelerde elektrikli otobüsler aktif olarak hizmet vermektedir. Elektrikli otobüslerin kent içi ulaşımında yaygınlaştırılması, Antalya gibi turistik bir şehirde hava kalitesinin korunmasına ve genel yaşam standartlarının iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Özellikle yaz aylarında artan turistik yoğunluk, trafik sıkışıklığı ve dizel yakıtlı otobüslerden kaynaklanan egzoz gazı emisyonları, kentte hava kirliliği seviyelerinin yükselmesine sebep olmaktadır. Elektrikli otobüslerin kullanımı, bu olumsuzlukların önüne geçerek, kent genelinde daha sağlıklı bir çevre oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Elektrikli otobüslerin yaygınlaşması, akıllı şehir projelerinin bir parçası olarak da değerlendirilmektedir. Antalya Büyükşehir Belediyesi, Horizon 2020 MAtchUP Akıllı Şehir Projesi kapsamında toplu taşıma filosuna elektrikli otobüslerin yanı sıra, elektrikli motosikletler ve elektrikli scooterlar gibi alternatif ulaşım araçlarını da entegre etmektedir. Bu adımlar, kentsel mobilitayı dönüştürerek, bireylerin daha sürdürülebilir ve çevre dostu ulaşım seçeneklerine yönlendirilmesine olanak tanımaktadır. Ancak, elektrikli otobüslerin verimli bir şekilde kullanılabilmesi için şarj altyapısının yeterli olması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, belediyeler ve ulaşım otoriteleri, şarj istasyonlarının kent içinde yaygınlaştırılması, enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesi ve hızlı şarj çözümlerinin yaygınlaştırılması gibi konular üzerinde çalışmalar yürütmektedir. Antalya’da elektrikli otobüslerin yaygınlaştırılması adına, şarj istasyonlarının sayısının artırılması ve stratejik olarak belirlenen noktalara entegre edilmesi yönünde önemli adımlar atılmaktadır.

Elektrikli otobüslerin benimsenmesi, sadece toplu taşıma maliyetlerini düşürmekle kalmamakta, aynı zamanda enerji verimliliği açısından da önemli fırsatlar sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklendiğinde, bu araçların karbon ayak izi daha da düşmekte ve sürdürülebilir şehir ulaşımına doğrudan katkı sağlamaktadır. Özellikle güneş ve rüzgar enerjisi gibi temiz enerji kaynakları ile çalışan şarj istasyonları, elektrikli otobüslerin çevresel etkilerini minimize ederek, kentlerin daha düşük emisyonlu ulaşım sistemlerine geçişini hızlandırmaktadır. Bunun yanı sıra, batarya teknolojilerindeki ilerlemeler, menzil kapasitesinin artırılması ve şarj sürelerinin kısaltılması yönünde önemli gelişmeler sağlamaktadır. Günümüzde, modern elektrikli otobüsler tek şarj ile 250 ila 400 kilometre arasında yol alabilmekte, bu da şehir içi toplu taşımada kesintisiz hizmet verilmesini mümkün kılmaktadır.

Elektrikli otobüslerin yaygınlaşması, sürdürülebilir ulaşım konusundaki toplumsal farkındalığı da artırmaktadır. Toplu taşıma sistemlerinde bu araçların kullanımının artması, bireyleri çevre dostu ulaşım seçeneklerine yönlendirmekte ve bireysel araç kullanımını azaltmaktadır. Bu durum, yalnızca karbon emisyonlarını düşürmekle kalmamakta, aynı zamanda trafik sıkışıklığını ve kent içindeki park sorunlarını da minimize etmektedir. Turistik yoğunluğun yüksek olduğu Antalya gibi şehirlerde, elektrikli otobüslerin kullanımı, kentsel altyapının daha etkin kullanılmasını sağlamakta ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine doğrudan katkıda bulunmaktadır.

Uzun vadede, fosil yakıt bağımlılığının azaltılması ve şehirlerin karbon nötr ulaşım sistemlerine geçiş yapması, elektrikli otobüslerin kent ulaşımında vazgeçilmez bir çözüm olarak konumlandırılmasını sağlayacaktır.

Antalya Büyükşehir Belediyesi, bu kapsamda elektrikli otobüslerin şehir içi ulaşımında kullanımını artırmak amacıyla Akdeniz Üniversitesi kampüsü gibi yoğun yolcu sirkülasyonunun olduğu bölgelerde bu araçları devreye sokmuştur. Elektrikli otobüslerin kısa mesafelerde daha verimli performans göstermesi, bu tür yerleşkelerde sürdürülebilir ulaşımın sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Elektrikli otobüslerin sıfır emisyonlu olmaları, özellikle hava kirliliğinin yoğun olduğu büyükşehirlerde büyük avantaj sağlamaktadır. Antalya gibi turistik bir şehirde hava kalitesinin korunması, hem yerel halkın sağlığını iyileştirmek hem de turistler için daha temiz bir çevre sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle yaz aylarında artan hava kirliliği, dizel yakıtlı otobüslerin egzoz gazı salınımı nedeniyle daha da kötüleşebilmektedir. Elektrikli otobüslerin yaygınlaşması, bu sorunun önüne geçilmesine yardımcı olmaktadır.

Antalya'da başlatılan elektrikli otobüs projeleri, yalnızca sürdürülebilir ulaşımı teşvik etmekle kalmamakta, aynı zamanda akıllı şehir uygulamalarına da entegre edilmektedir. Bu kapsamda, Horizon 2020 MAtchUP Akıllı Şehir Projesi kapsamında Antalya Büyükşehir Belediyesi, belediye filosuna elektrikli otobüslerin yanı sıra, elektrikli motosiklet ve elektrikli scooter gibi çevreci ulaşım çözümlerini de dahil etmiştir. Elektrikli otobüslerin şehir genelinde daha fazla benimsenmesi için altyapı yatırımları da büyük önem taşımaktadır. Şarj istasyonlarının sayısının artırılması ve bu istasyonların stratejik noktalara yerleştirilmesi, elektrikli otobüslerin daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Antalya Büyükşehir Belediyesi, bu doğrultuda elektrikli otobüslerin kullanımını yaygınlaştırmak için gerekli altyapı çalışmalarına hız vermiştir.

Elektrikli otobüslerin benimsenmesi, enerji verimliliği açısından büyük fırsatlar sunmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin kullanılması, bu otobüslerin çevresel etkilerini daha da azaltmaktadır. Güneş ve rüzgar enerjisinden elde edilen elektrik ile çalışan otobüsler, karbon ayak izini minimize ederek sürdürülebilir şehir ulaşımına katkıda bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, lityum-

iyon batarya teknolojilerindeki gelişmeler, elektrikli otobüslerin menzil kapasitesini artırmakta ve şarj sürelerini kısaltmaktadır. Geçmiş yıllarda, elektrikli otobüslerin menzil sınırlamaları nedeniyle uzun mesafelerde kullanımı mümkün değilken, günümüzde batarya kapasitesinin artırılmasıyla birlikte bu engel büyük ölçüde aşılmıştır. Örneğin, modern elektrikli otobüslerin tek şarjla 250-400 kilometre arasında yol alabilmesi, şehirler arası ulaşımında bile bu araçların kullanımını mümkün kılmaktadır.

Elektrikli otobüslerin yaygınlaşması, sürdürülebilir kent içi ulaşım sistemlerinin gelişimi açısından kritik bir adım olarak değerlendirilmekte olup, toplumsal bilinç düzeyinin artırılmasına da katkı sağlamaktadır. Toplu taşıma sistemlerinde elektrikli otobüslerin kullanımının artması, bireylerin çevre dostu ulaşım alternatiflerine yönlendirilmesini teşvik etmekte ve karbon emisyonlarını azaltarak ekolojik dengenin korunmasına yardımcı olmaktadır. Dizel motorlu araçlardan kaynaklanan hava kirliliğinin ve partikül madde salınımının önüne geçilmesi, şehir içindeki hava kalitesinin iyileştirilmesine ve halk sağlığının korunmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Elektrikli otobüslerin sessiz çalışması, kentlerde gürültü kirliliğinin azaltılmasına da yardımcı olarak, yaşam kalitesini yükseltmekte ve kent sakinlerine daha konforlu bir ulaşım deneyimi sunmaktadır. Turizm açısından büyük bir cazibe merkezi olan Antalya gibi şehirlerde, elektrikli otobüslerin kullanımı, hem çevresel hem de ekonomik faydalar sunarak turistik altyapının güçlendirilmesine yardımcı olmaktadır. Turistlerin çevre dostu ulaşım alternatiflerini tercih etme eğilimi, şehir içi ulaşım sistemlerinde sürdürülebilir seçeneklerin yaygınlaştırılmasını zorunlu hale getirmektedir. Elektrikli otobüslerin kullanımı, turistik bölgelerde hava kirliliğini azaltarak doğal çevrenin korunmasına destek olmakta ve sürdürülebilir turizmin gelişimine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, elektrikli otobüslerin yaygınlaşması, yerel ekonomiye doğrudan ve dolaylı katkılar sunmakta; enerji tüketim maliyetlerinin düşmesi, ulaşım hizmetlerinin verimliliğinin artması ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılması açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak, elektrikli otobüslerin yaygınlaşmasını engelleyen bazı önemli faktörler bulunmaktadır. Yüksek başlangıç maliyetleri, belediyelerin ve özel toplu taşıma işletmelerinin elektrikli otobüsleri mevcut ulaşım sistemlerine entegre etmesini zorlaştıran en büyük engellerden biri olarak öne çıkmaktadır. Elektrikli otobüslerin ilk yatırım maliyetleri, dizel motorlu otobüslere kıyasla daha yüksek olmasına rağmen, uzun vadede yakıt

tasarrufu, düşük bakım giderleri ve devlet teşvikleri sayesinde ekonomik olarak daha avantajlı hale gelmektedir. Küresel ölçekte elektrikli otobüslere yönelik teşvik mekanizmalarının genişletilmesi, uluslararası finansal desteklerin artırılması ve sürdürülebilir ulaşım projelerinin yaygınlaştırılması, bu araçların toplu taşıma sistemlerinde daha etkin kullanılmasını sağlayacaktır. Elektrikli otobüslerin uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından batarya teknolojilerinin geliştirilmesi ve geri dönüşüm süreçlerinin etkin hale getirilmesi büyük önem taşımaktadır. Günümüzde lityum-iyon bataryalar, elektrikli otobüslerin enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakta olup, batarya ömrünün uzatılması ve şarj sürelerinin kısaltılması için Ar-Ge çalışmaları hız kazanmıştır. Bataryaların geri dönüştürülmesi ve tekrar kullanıma uygun hale getirilmesi, elektrikli otobüslerin çevresel etkilerini minimize edecek ve döngüsel ekonomi modellerinin benimsenmesini teşvik edecektir. Gelecekte, enerji depolama çözümlerinin gelişmesiyle birlikte, elektrikli otobüslerin kullanımının daha yaygın hale gelmesi ve fosil yakıtlı araçlara olan bağımlılığın azalması beklenmektedir. Bu doğrultuda, belediyeler ve ulaşım otoriteleri, akıllı şarj altyapılarının genişletilmesi, hızlı şarj teknolojilerinin entegrasyonu ve yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre edilmiş şarj istasyonlarının yaygınlaştırılması yönünde stratejik adımlar atmalıdır.

4.2.2. LPG yakıtlı araçların performans analizi

Likit Petrol Gazı (LPG) ile çalışan otobüsler, günümüzde toplu taşıma sistemlerinde çevresel etkilerin azaltılması ve ekonomik verimliliğin artırılması amacıyla önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. LPG, bütan ve propan gazlarının özel oranlarda karışımından oluşan, yanma sırasında düşük karbon emisyonu üreten ve fosil yakıt tüketiminin azaltılmasına katkı sağlayan bir enerji kaynağıdır. Özellikle kent içi ulaşımında düşük yakıt maliyeti ve çevre dostu özellikleri sayesinde yaygın olarak tercih edilmeye başlanmıştır. LPG'nin yanma süreci, benzin ve dizel yakıtlara göre daha temiz olduğundan, motor içindeki karbon birikimini azaltarak motor ömrünü uzatmakta ve bakım gereksinimlerini minimize etmektedir. Bu özellikleri, LPG'li otobüsleri hem çevresel hem de ekonomik açıdan avantajlı hale getirmektedir. LPG'li otobüslerin kullanımı, dizel ve benzinli motorlara kıyasla yakıt maliyetlerini önemli ölçüde düşürmektedir. Geleneksel dizel otobüsler, yüksek yakıt tüketimleri nedeniyle belediyeler ve toplu taşıma işletmeleri için büyük bir maliyet kalemi oluşturmaktadır.

LPG'nin litre bazında maliyetinin daha düşük olması ve daha verimli yanma sağlaması, bu otobüslerin işletme giderlerini düşürerek yerel yönetimlerin sürdürülebilir ulaşım politikalarına destek olmaktadır. LPG'li otobüsler, içten yanmalı motorlara sahip olmalarına rağmen, yanma sürecinde daha düşük karbon emisyonu ve daha az partikül madde salınımı gerçekleştirdiğinden, şehir içi hava kirliliğinin azaltılmasına katkı sunmaktadır. Bu durum, özellikle hava kirliliği seviyesinin yüksek olduğu büyük metropollerde ve turistik şehirlerde, halk sağlığını koruma açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır.

LPG'nin çevresel etkileri, fosil yakıtlar içinde daha düşük karbon emisyonuna sahip olması nedeniyle sürdürülebilir ulaşım açısından dikkate değer bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Karbondioksit CO₂ azot oksitler NO_x ve sülfür dioksit SO₂ emisyonlarının dizel yakıtlara oranla daha düşük olması, hava kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlamak ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir adım teşkil etmektedir. LPG'nin yanma sürecinde üretilen karbon monoksit CO ve hidrokarbon HCHC miktarlarının düşük seviyede olması, kentlerde hava kalitesini olumlu yönde etkileyerek, insan sağlığını tehdit eden zararlı gazların atmosferde birikmesini önlemektedir. Avrupa'daki birçok yerel yönetim, bu avantajları göz önünde bulundurarak, toplu taşıma sistemlerinde LPG'li otobüslerin kullanımını artırmaya yönelik çeşitli teşvik mekanizmaları geliştirmiştir. Antalya Büyükşehir Belediyesi de bu doğrultuda, kent içi ulaşım sistemini daha çevreci bir yapıya kavuşturmak amacıyla LPG'li otobüsleri toplu taşıma filosuna dahil etme projeleri yürütmektedir. LPG'li otobüslerin işletme verimliliği, hem maliyet hem de operasyonel esneklik açısından çeşitli avantajlar sunmaktadır. Yakıt ikmal sürecinin hızlı olması, toplu taşıma hizmetlerinde kesintisiz operasyon sağlanmasına yardımcı olmaktadır. LPG'nin geniş bir dağıtım ağına sahip olması, yakıt erişilebilirliği açısından kolaylık sunarak bu otobüslerin kent içinde kesintisiz hizmet verebilmesini sağlamaktadır. Dizel veya elektrikli otobüslere kıyasla daha kısa sürede yakıt dolumu yapılabilmesi, özellikle yoğun hatlarda çalışan otobüslerin daha az bekleme süresiyle çalışmasını mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, LPG'nin sıvı halde depolanması ve taşınması belirli güvenlik önlemlerini zorunlu kılmaktadır. Yakıt tanklarının basınca dayanıklı şekilde tasarlanması ve olası sızıntı risklerini minimize edecek güvenlik önlemlerinin alınması, LPG'li otobüslerin toplu taşıma sistemlerinde güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, LPG'li otobüslerin düzenli bakım

süreçlerinden geçmesi ve belirlenen güvenlik denetimlerine tabi tutulması, bu araçların uzun vadeli kullanımının sürdürülebilirliğini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Gelişen teknoloji ve güvenlik standartlarının iyileştirilmesiyle birlikte, LPG'li otobüslerin modern toplu taşıma sistemlerinde daha geniş ölçekte benimsenmesi beklenmektedir.

LPG'li otobüslerin performans açısından değerlendirilmesi, motor teknolojisi, yakıt sistemi verimliliği ve kullanım ömrü bağlamında birçok önemli faktörü içermektedir. Geleneksel içten yanmalı motorlara kıyasla farklı teknik gereksinimlere sahip olan LPG'li otobüsler, daha düşük yanma sıcaklığına sahip olmaları nedeniyle özel enjeksiyon sistemleri ve ateşleme teknolojileri gerektirmektedir. Yanma sürecinin dizel yakıtlara kıyasla daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi, motorun aşırı ısınmasını engellemekte ve uzun vadeli performans kayıplarını minimize etmektedir. LPG'nin yanma süreci daha temiz olduğundan, karbon birikimi azalmakta ve motor bileşenlerinin ömrü uzamaktadır. Bu durum, bakım maliyetlerini düşürmekte ve daha az motor arızası ile daha sürdürülebilir bir toplu taşıma ağı oluşturmaya katkı sağlamaktadır. LPG'li otobüslerin güç ve tork performansları incelendiğinde, bazı kullanıcı deneyimleri, bu araçların özellikle yokuş yukarı çıkışlarda ve yüksek hız gerektiren durumlarda dizel motorlara kıyasla daha düşük performans gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak bu durum, motor sistemlerinin doğru kalibrasyonu ve LPG yakıt enjeksiyon sistemlerinin optimize edilmesi ile büyük ölçüde giderilebilmektedir. Özellikle modern LPG motorlarında geliştirilen yeni nesil ateşleme sistemleri, motorun düşük sıcaklıklarda dahi yüksek verimlilikle çalışmasını sağlayarak, güç kayıplarını minimize etmektedir. Buna ek olarak, LPG'li otobüslerde kullanılan elektronik kontrol sistemleri, yakıt karışımının hassas bir şekilde düzenlenmesine yardımcı olmakta ve motorun anlık güç ihtiyacına göre daha verimli çalışmasına olanak tanımaktadır. Antalya Büyükşehir Belediyesi, toplu taşıma filosunun modernizasyonu kapsamında LPG'li otobüslerin kullanımını teşvik eden stratejik adımlar atmaktadır. 2024 yılı itibarıyla, fosil yakıt tüketimini azaltmak ve çevresel sürdürülebilirliği artırmak amacıyla hem elektrikli hem de LPG'li otobüslerden oluşan yeni bir filo devreye alınmıştır. Bu adım, kent içi ulaşımında düşük karbon emisyonuna sahip alternatif yakıt teknolojilerinin yaygınlaştırılmasını hedefleyen sürdürülebilir ulaşım politikalarının bir parçası olarak değerlendirilmiştir. Antalya gibi turistik bir şehirde trafik yoğunluğunun azalması ve hava kirliliğinin

kontrol altına alınması, LPG'li otobüslerin şehir içi ulaşım sistemlerinde önemli bir yere sahip olmasını sağlamaktadır. Turizm merkezlerinde temiz hava kalitesinin korunması, doğa dostu ulaşım araçlarının yaygınlaştırılması ve kentsel sürdürülebilirlik politikalarının geliştirilmesi açısından LPG'li otobüslerin uzun vadeli katkılar sunması beklenmektedir. Yerel yönetimler, sürdürülebilir ulaşım projeleri çerçevesinde LPG'li otobüslerin kullanımını artırmaya yönelik altyapı yatırımları yaparak, düşük emisyonlu ulaşım politikalarını daha geniş kitlelere yaymayı hedeflemektedir. LPG'li otobüslerin uzun vadede toplu taşıma sistemlerine entegrasyonu, enerji güvenliği açısından da büyük önem taşımaktadır. Küresel enerji krizleri ve fosil yakıt rezervlerinin azalması, alternatif yakıt teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. LPG'nin yaygın olarak bulunabilir olması, bu yakıtın geçiş dönemi için ideal bir seçenek haline gelmesini sağlamaktadır. Elektrikli otobüslerin altyapı gereksinimlerinin her şehirde uygulanabilir olmaması nedeniyle, LPG'li otobüsler özellikle orta vadede daha sürdürülebilir bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Şehir içi ulaşımında karbon emisyonlarının azaltılması hedefi doğrultusunda, LPG'li otobüslerin kullanımı, düşük maliyetli, çevre dostu ve enerji verimli bir seçenek olarak önemini korumaktadır. Bu bağlamda, LPG'li otobüslerin yaygınlaşması, hem yerel yönetimlerin sürdürülebilir ulaşım politikalarına hem de karbon nötr ulaşım hedeflerine önemli katkılar sunmaktadır.

4.2.3. Hibrit teknolojilerin uygulanabilirliği

Hibrit araçlar, günümüz otomotiv sektöründe çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından devrim niteliğinde bir dönüşümü temsil etmektedir. Geleneksel içten yanmalı motor teknolojisinin karbon emisyonlarını ve fosil yakıt bağımlılığını artıran olumsuz etkileri karşısında hibrit araçlar, daha düşük yakıt tüketimi, daha az hava kirliliği ve enerji tasarrufu sağlayan alternatif bir çözüm sunmaktadır. Bu araçlar, içten yanmalı motor ile elektrik motorunu bir araya getirerek her iki teknolojinin avantajlarını optimize ederken dezavantajlarını da minimize etmektedir. Küresel ölçekte giderek yaygınlaşan hibrit otomobiller, özellikle şehir içi ulaşımında yakıt verimliliği sağlayarak ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir mobilite sistemi oluşturmaktadır.

Hibrit teknolojisinin temel prensibi, farklı sürüş senaryolarında enerji kullanımını en üst düzeyde optimize etmeye dayanmaktadır. Araçlar, düşük hızlarda ve yoğun şehir içi trafikte yalnızca elektrik motoru ile çalışarak sıfır emisyon üretirken, yüksek hızlarda veya uzun mesafeli yolculuklarda içten yanmalı motor devreye girerek bataryayı desteklemektedir. Hibrit araçların enerji yönetim sistemleri, sürüş dinamiklerine göre motor geçişlerini akıllı bir şekilde düzenleyerek maksimum verimlilik sağlamaktadır. Rejeneratif frenleme sistemi, frenleme sırasında açığa çıkan kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülerek bataryanın yeniden şarj edilmesine olanak tanımakta ve böylece aracın toplam enerji tüketimini azaltmaktadır. Hibrit sistemlerin düşük enerji kaybı ile çalışması, yakıt tüketimini minimize etmekte ve geleneksel içten yanmalı motorlara kıyasla çok daha ekonomik bir sürüş deneyimi sunmaktadır. Hibrit araçların çevresel etkileri değerlendirildiğinde, özellikle karbon salınımını azaltmadaki rolleri büyük bir öneme sahiptir. Geleneksel benzinli ve dizel motorların atmosfere büyük miktarda karbondioksit, azot oksit ve partikül madde salınımına neden olduğu bilinmektedir. Hibrit sistemler ise yakıt tüketimini ve egzoz emisyonlarını minimize ederek hava kirliliğinin düşürülmesine katkıda bulunmakta, özellikle büyük şehirlerde hava kalitesinin iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır. Küresel iklim değişikliğiyle mücadelede hibrit teknolojiler, tamamen elektrikli araçlara geçiş sürecinde kritik bir ara çözüm olarak değerlendirilmekte ve altyapı eksiklikleri tamamlanana kadar düşük emisyonlu bir alternatif sunmaktadır. Bu nedenle, Avrupa, Asya ve Amerika'daki birçok ülke, karbon emisyonlarını azaltma hedefleri doğrultusunda hibrit araç kullanımını teşvik eden politikalar geliştirmekte ve tüketicileri bu yönde bilinçlendirmektedir. Türkiye'de de hibrit araçlara yönelik ilginin hızla artması, 2024 yılı itibarıyla hibrit otomobil satışlarının toplam pazar içindeki payının %18,8'e ulaşmasıyla kendini göstermektedir. Bu eğilim, otomotiv sektöründe hibrit araçların uzun vadede daha yaygın hale geleceğine işaret etmektedir.

Hibrit araçlar ekonomik açıdan uzun vadeli faydalar sunarak geleneksel içten yanmalı motorlara sahip araçlara kıyasla daha düşük işletme maliyetleriyle öne çıkmaktadır. Yakıt tüketiminin azalması sayesinde uzun süreli kullanımda toplam sahip olma maliyetleri belirgin şekilde düşmekte ve bu durum bireysel kullanıcılar kadar ticari filolar için de büyük avantajlar sağlamaktadır. İlk satın alma maliyetleri içten yanmalı motorlu araçlara göre daha yüksek olmasına rağmen, yakıt giderlerinin azalması ve hibrit sistemlerde mekanik aşınmanın daha düşük olması, uzun vadede araç sahipleri

için önemli finansal tasarruflar sunmaktadır. Hibrit otomobillerin daha az motor yıpranması ve daha az hareketli parçaya sahip olması, bakım ve onarım maliyetlerinin de minimize edilmesine katkı sağlamaktadır. Elektrik motorunun devreye girdiği düşük hız koşullarında içten yanmalı motorun çalışma süresi kısalmakta, bu da motorun ömrünü uzatarak bakım periyotlarını azaltmaktadır. Hibrit araçların ikinci el piyasasındaki değerleri de geleneksel araçlara kıyasla daha yüksek olmakta, bu durum yatırım geri dönüşü açısından sahipleri için ek avantajlar sunmaktadır. Elektrikli ve hibrit araçlara olan talebin giderek artması, ikinci el piyasasında bu araçların daha yüksek fiyatlarla işlem görmesini sağlamaktadır. Ancak hibrit araçların yaygınlaşmasının önünde bazı teknik ve ekonomik engeller bulunmaktadır. Hibrit araçlarda kullanılan karmaşık batarya yönetim sistemleri ve çift motor teknolojisi, üretim maliyetlerini artırarak araç fiyatlarını geleneksel modellere kıyasla daha pahalı hale getirmektedir. Batarya ömrü ve değişim maliyetleri de tüketicilerin hibrit araçlara geçiş sürecinde dikkate aldığı önemli faktörler arasında yer almaktadır. Ancak, batarya teknolojilerinde yaşanan ilerlemeler, özellikle lityum-iyon batarya üretim maliyetlerinin düşmesi ve geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesi, bu sorunların giderek azalmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, hibrit araçların bakım maliyetleri de geleneksel araçlara kıyasla bazı farklılıklar göstermektedir. Elektrik motorunun daha az mekanik bileşene sahip olması ve daha az aşınmaya maruz kalması, uzun vadede bakım maliyetlerini düşürse de, batarya ve güç yönetim sistemlerinin düzenli olarak kontrol edilmesi gerekliliği, servis maliyetleri üzerinde belirli bir etki yaratmaktadır. Buna rağmen, hibrit teknolojisinin gelişimi ve üretim maliyetlerinin azalması ile birlikte bu araçların ekonomik avantajları daha da belirgin hale gelecek ve yaygın kullanımları artacaktır.

4.2.4. Aktif ulaşım modlarının entegrasyonu (bisiklet ve yaya ulaşımı)

Bisiklet ve yaya ulaşımının kentsel ulaşım sistemleriyle entegrasyonu, sürdürülebilir şehircilik politikalarının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Giderek artan kentleşme, motorlu taşıtlara olan bağımlılığı artırarak trafik sıkışıklığını, hava kirliliğini ve karbon emisyonlarını yükseltmekte, bu durum hem çevresel hem de sosyal anlamda önemli sorunlara yol açmaktadır. Bisiklet ve yaya ulaşımının yaygınlaştırılması, şehirlerin ulaşım ağlarını daha etkin, sağlıklı ve çevreci hale getirmeye katkı sağlamakta, aynı zamanda bireylerin fiziksel aktivite seviyelerini

artırarak toplum sağlığını olumlu yönde etkilemektedir. Ŗehirlerin giderek büyüyen nüfusu ve ulaşım altyapısı üzerindeki artan baskı, geleneksel ulaşım modellerine alternatif çözümler geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, bisiklet ve yaya ulaşımının teşvik edilmesi, kent içi mobilitenin yeniden şekillendirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Ŗehirlerde bisiklet ve yaya ulaşımına öncelik verilmesi, motorlu taşıtlara olan bağımlılığı azaltarak trafik yoğunluğunun hafifletilmesine ve ulaşım altyapısının daha etkin kullanılmasına olanak tanımaktadır. Kentsel hareketliliğin yeniden yapılandırılmasında, bisiklet yolları ile yaya bölgelerinin sistematik olarak entegre edilmesi, şehir içi ulaşımın çok modlu bir yapıya dönüşmesini sağlamakta ve böylece kent sakinlerinin farklı ulaşım modları arasında geçiş yapmasını kolaylaştırmaktadır. Özellikle yoğun şehir merkezlerinde, bisiklet ve yaya ulaşımı, bireysel araç kullanımının azaltılmasına yardımcı olarak toplu taşıma sistemlerinin verimliliğini artırmakta, kent içi hareketliliği daha sürdürülebilir hale getirmektedir. Kent içindeki kısa mesafeli yolculukların büyük bir bölümü motorlu taşıtlarla gerçekleştirildiğinden, bisiklet ve yaya ulaşımının teşvik edilmesi, trafik sıklıklığını önemli ölçüde azaltabilecek potansiyele sahiptir.

Bisiklet altyapısının doğru planlanması ve uygulanması, kentsel ulaşım sistemlerinde sürdürülebilirliğin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Ŗehirlerde bisiklet kullanımının artırılabilmesi için güvenli, kesintisiz ve erişilebilir bisiklet yollarının oluşturulması gerekmektedir. Motorlu taşıt yollarından ayrılmış ve kesintisiz bir bağlantı ağına sahip bisiklet yolları, kullanıcıların güvenliğini sağlarken, şehir içi bisiklet ulaşımını teşvik eden en önemli faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bisiklet yollarının yeterli genişlikte ve standardize edilmiş altyapıya sahip olması, bisiklet kullanıcılarının konforlu bir sürüş deneyimi yaşamasına ve bisikletin bir ulaşım aracı olarak benimsenmesine katkı sunmaktadır. Ŗehir planlamasında bisiklet dostu politikaların geliştirilmesi, toplu taşıma ile entegre bisiklet paylaşım sistemlerinin yaygınlaştırılması ve bisiklet park alanlarının artırılması, bisikletin ulaşım sisteminin önemli bir parçası haline getirilmesini sağlamaktadır. Bisiklet kullanımının teşvik edilmesi, ulaşımda fosil yakıt tüketiminin azalmasına yardımcı olmakta, karbon emisyonlarını düşürerek çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Akıllı bisiklet paylaşım sistemlerinin gelişimi, bisikletlerin bireysel kullanım dışında

toplu taşıma istasyonları ve şehir merkezleri ile entegre edilerek daha geniş kitlelere ulaşmasını mümkün kılmaktadır. Modern şehirlerde bisikletin sadece rekreasyonel bir araç olarak değil, günlük ulaşımın ayrılmaz bir parçası olarak görülmesi, ulaşım politikalarının yeniden şekillendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bisiklet yollarının yaygınlaştırılması ve şehir içi ulaşım sistemlerine entegrasyonu, bisikletin ekonomik, çevresel ve sağlık açısından sunduğu avantajların daha geniş ölçekte değerlendirilmesine imkan tanımaktadır. Bisiklet kullanımının artırılması, trafik sıkışıklığını azaltırken, bireylerin fiziksel aktivite seviyelerinin yükselmesine de katkıda bulunmaktadır. Uygun bisiklet yolları ağı ve bilinçli şehir planlama yaklaşımları ile bisikletin, kent içi ulaşımın etkin bir bileşeni haline getirilmesi mümkündür.

Yaya ulaşımının kentsel planlamada öncelikli hale getirilmesi, kentlerin yaşanabilirliğini artırarak kent sakinlerinin günlük yaşam kalitesini yükseltmekte ve şehirlerin sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşmasına katkı sağlamaktadır. Yaya ulaşımının teşvik edilmesi, motorlu taşıtlara olan bağımlılığı azaltarak kent merkezlerinde daha sakin, güvenli ve sağlıklı bir çevrenin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Modern şehircilik anlayışı, ulaşım politikalarını insan odaklı hale getirerek yaya hareketliliğini artırmayı amaçlamakta, bu doğrultuda kent içi ulaşım ağlarının yaya öncelikli olacak şekilde yeniden düzenlenmesini teşvik etmektedir. Yaya yollarının genişletilmesi, yaya bölgelerinin artırılması, kaldırımların erişilebilirlik standartlarına uygun olarak tasarlanması ve şehir merkezlerindeki araç trafiğinin belirli bölgelerde sınırlandırılması, yayaların kent içinde daha özgür ve güvenli bir şekilde hareket etmelerini sağlamaktadır. Kent merkezlerinde araç trafiğinin azaltılması ve yaya dostu uygulamaların yaygınlaştırılması, şehir içi ulaşım sistemlerinin daha verimli işlemesine yardımcı olmakta, aynı zamanda bireylerin daha fazla fiziksel aktivite yapmasını teşvik ederek toplum sağlığını olumlu yönde etkilemektedir. Yayalar için kesintisiz ve güvenli güzergahların oluşturulması, trafik akışından bağımsız yaya yollarının artırılması ve kent içindeki yeşil alanlarla bütünleşik yaya koridorlarının tasarlanması, şehirlerin hem ekolojik hem de sosyal sürdürülebilirliğini artırmaktadır. Yaya hareketliliğini teşvik eden bu uygulamalar, şehir sakinlerinin motorlu taşıtlara olan bağımlılığını azaltarak hem bireysel hem de toplumsal ölçekte karbon ayak izinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Yaya ulaşımına yönelik altyapı yatırımları, modern kent planlamasının temel unsurlarından

biri olarak değerlendirilmekte ve geleceğin şehirlerinin ulaşım politikalarını şekillendirmektedir. Yaya öncelikli ulaşım politikalarının benimsenmesi, yayaların kent içinde konforlu, güvenli ve kesintisiz bir hareket alanına sahip olmalarını sağlayarak, şehir içi ulaşımındaki motorlu taşıt yükünü hafifletmekte ve sürdürülebilir bir ulaşım ekosisteminin oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır. Kent merkezlerinde yaya ulaşımına öncelik verilmesi, sadece trafik sıkışıklığını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda daha temiz bir çevre, daha sağlıklı bir toplum ve daha yaşanabilir şehirler yaratılmasını mümkün kılmaktadır. Bu doğrultuda, yaya hareketliliğini artırmaya yönelik stratejilerin benimsenmesi, kentsel sürdürülebilirlik açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Bisiklet ve yaya ulaşımının entegre edilmesi, kentsel hareketliliğin sürdürülebilirliğini artırmak ve toplu taşıma sistemlerinin daha etkin kullanılmasını sağlamak açısından önemli bir strateji olarak kabul edilmektedir. Kent içi ulaşımın sadece motorlu taşıtlara dayalı olarak şekillendirilmesi, trafik sıkışıklığını artırarak çevresel kirliliği derinleştirmekte ve bireylerin hareketliliğini kısıtlamaktadır. Bu nedenle, bisiklet ve yaya ulaşımının toplu taşıma sistemleriyle bütünleşik hale getirilmesi, bireylerin alternatif ulaşım modlarını benimsemesini teşvik ederek kentlerin daha yaşanabilir hale gelmesine olanak tanımaktadır. Bisiklet yollarının ve yaya geçitlerinin toplu taşıma istasyonları ile doğrudan bağlantılı olması, bireylerin evlerinden iş yerlerine, eğitim kurumlarına ve sosyal alanlara daha hızlı ve çevre dostu bir şekilde ulaşmasını sağlamakta, böylece şehir içindeki ulaşım yükünün hafifletilmesine katkı sunmaktadır. Bisiklet ve yaya ulaşımının toplu taşıma ile entegre edilmesi, ulaşım sistemlerinin çok modlu hale gelmesini destekleyerek bireylerin motorlu taşıtlara olan bağımlılığını azaltmaktadır.

Kent içinde kısa mesafeli yolculukların büyük bir bölümü özel araçlarla gerçekleştirilmekte olup, bu durum hem trafik yoğunluğunu artırmakta hem de ulaşım sistemlerinin verimliliğini düşürmektedir. Oysa bisiklet ve yaya yollarının toplu taşıma ile uyum içinde çalışması, bireylerin özel araç kullanımını azaltarak trafik akışını daha düzenli hale getirmekte ve şehirlerin genel yaşam kalitesini artırmaktadır. Bu doğrultuda, bisiklet paylaşım sistemlerinin yaygınlaştırılması, toplu taşıma istasyonlarına entegre bisiklet park alanlarının oluşturulması ve yaya yollarının otobüs, tramvay ve metro durakları ile doğrudan bağlantılı hale getirilmesi gibi

stratejiler, kentsel ulaşımın daha sürdürülebilir bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır. Bisiklet ve yaya ulaşımının artırılması yalnızca ulaşım sistemlerini optimize etmekle kalmayıp, bireylerin fiziksel aktivite düzeylerini yükselterek halk sağlığını da olumlu yönde etkilemektedir. Günümüzde birçok şehir, motorlu taşıt trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde yayalara ve bisikletlilere özel koridorlar oluşturarak bireylerin güvenli şekilde hareket etmelerini sağlamakta, böylece sağlıklı yaşamı teşvik eden ulaşım sistemlerini hayata geçirmektedir. Trafik yoğunluğunu azaltan ve bireylerin daha fazla hareket etmesini sağlayan bu yaklaşımlar, obezite, kalp hastalıkları ve solunum yolu hastalıkları gibi sağlık problemlerinin önlenmesine de katkı sunmaktadır. Bununla birlikte, bisiklet ve yaya yollarının toplu taşıma sistemleriyle bütünleşik bir biçimde tasarlanması, yolculuk sürelerini kısaltmakta ve kent sakinlerinin ulaşım maliyetlerini azaltarak ekonomik avantajlar sunmaktadır. Özellikle düşük gelir gruplarına mensup bireyler için bisiklet ve yaya ulaşımı, ekonomik açıdan erişilebilir bir ulaşım seçeneği sunarak sosyal eşitliği destekleyen bir faktör haline gelmektedir.

Kent içi ulaşım politikalarının sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda yeniden şekillendirilmesi, bisiklet ve yaya ulaşımına yönelik yatırımların artırılmasıyla mümkündür. Bisiklet yollarının güvenli hale getirilmesi, yaya kaldırımlarının genişletilmesi, toplu taşıma duraklarına bisiklet park alanlarının entegre edilmesi ve yaya öncelikli ulaşım bölgelerinin oluşturulması, kentlerin daha yaşanabilir hale gelmesine katkı sağlamaktadır. Modern şehircilik anlayışı, bisiklet ve yaya ulaşımının teşvik edilmesini ulaşım planlamasının temel bir bileşeni olarak görmekte, bu doğrultuda insan odaklı yaklaşımların benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Bisiklet ve yaya hareketliliğinin artırılması, kent sakinlerinin daha sağlıklı, çevre dostu ve ekonomik ulaşım seçeneklerine yönelmesini teşvik ederken, kentsel mobilitenin daha verimli ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır. Bisiklet ve yaya ulaşımına yönelik politikaların geliştirilmesi ve bu doğrultuda altyapı yatırımlarının artırılması, şehirlerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasına katkı sağlayan önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Motorlu taşıtlara bağımlılığı azaltarak karbon emisyonlarını düşüren, bireylerin sosyal etkileşimini artıran ve kentsel hareketliliği yeniden şekillendiren bisiklet ve yaya ulaşımı, geleceğin şehirlerinde ulaşım politikalarının temel taşı olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, bisiklet ve yaya yollarının modern şehircilik anlayışına uygun şekilde planlanması, şehirlerin çevresel sürdürülebilirlik açısından daha güçlü bir yapıya kavuşmasını sağlayacak, toplu taşıma

sistemleriyle bütünleşik ulaşım ağı oluşturulmasına katkı sunarak kent yaşamını daha verimli ve sağlıklı bir hale getirecektir.

4.3. Ekonomik Değerlendirme: Fayda-Maliyet Analizi Sonuçları

Antalya ili toplu taşıma sisteminde düşük karbonlu teknolojilere geçişin ekonomik uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen fayda-maliyet analizi, bu araştırmanın temel metodolojik yaklaşımını oluşturmaktadır. Bu analiz kapsamında, mevcut fosil yakıt temelli sistem ile elektrikli otobüs teknolojisine dayalı alternatif sistem arasında kapsamlı bir ekonomik karşılaştırma yapılmış, her iki sistemin uzun vadeli mali etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Analizin güvenilirliği açısından, maliyet ve fayda bileşenleri detaylı kategorilere ayrılarak hesaplanmış, farklı senaryo koşullarında sonuçların değişkenliği test edilmiştir. Bu yaklaşım, karar alıcılara düşük karbonlu dönüşümün sadece çevresel faydalarını değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirliğini de gösteren somut veriler sunmayı amaçlamaktadır. Elde edilen bulgular, Antalya Büyükşehir Belediyesi'nin uzun vadeli yatırım planlaması süreçlerinde bilimsel bir temel oluşturacak niteliktedir.

4.3.1. Maliyet bileşenleri: yatırım, işletme ve bakım

Antalya Büyükşehir Belediyesi'nin toplu taşıma sisteminde dizel otobüslerden düşük karbonlu elektrikli otobüslere geçiş süreci, çok boyutlu ve uzun vadeli bir planlama gerektirmektedir. Bu dönüşümün en kritik boyutlarından biri maliyet analizidir. Elektrikli toplu taşıma teknolojilerine geçişte, yatırım maliyetleri (araç alımları, şarj istasyonları ve elektrik altyapısı yatırımları), işletme maliyetleri (enerji tüketimi, personel giderleri, eğitim ve işletim planlaması) ve bakım maliyetleri (batarya yenileme, teknik bakım altyapısı, yedek parça temini vb.) ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Bu bölümde, Antalya ilinin özgün koşulları göz önünde bulundurularak söz konusu maliyet bileşenleri doktora düzeyinde akademik bir yaklaşımla analiz edilmektedir. Antalya'nın mevcut toplu taşıma altyapısı, nüfus yapısı, turizm kaynaklı mevsimsel dalgalanmaları, iklim koşulları ve mevcut otobüs filosunun dönüşüm ihtiyaçları, maliyet bileşenlerinin nasıl şekilleneceğini doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla, elektrikli otobüslere geçişin Antalya ölçeğinde fizibilitesi ve sürdürülebilirliği, bu maliyet unsurlarının detaylı incelenmesiyle ortaya

konmaktadır. Aşağıda, yatırım, işletme ve bakım maliyet kalemleri ayrı alt başlıklar halinde ele alınmakta; her bir kalemin Antalya'nın yerel dinamiklerine göre değerlendirmesi yapılmakta ve literatür ile güncel veriler ışığında tartışılmaktadır.

4.3.1.1. İlk yatırım ve işletme maliyetleri

Yakıt Hücreli Elektrikli Otobüsler (FCEB), 12 metre uzunluğundaki standart konfigürasyonlarda 85-120 kW güç kapasitesine sahip yakıt hücresi sistemi ve 50-120 kWh batarya kapasitesiyle donatılmış olup, şehir içi toplu taşıma hizmetlerinde 320-515 kilometre arasında güvenilir menzil sunmaktadır. Bu otobüslerin temel sermaye maliyeti yaklaşık 1 milyon ABD doları olarak belirlenmekte ve günlük operasyonlar sırasında ortalama 35 kilogram hidrojen yakıt tüketimi gerçekleştirmektedir. Yakıt hücresi sistemi tarafından üretilen elektrik enerjisi, hem otobüsün elektrik motorunu beslemekte hem de bataryaların şarj edilmesini sağlamakta, bu teknolojik entegrasyon sayesinde araçlar şarj veya yakıt ikmali yapmadan uzun mesafeli operasyonlar gerçekleştirebilmektedir. Bu teknik özellikler ve performans verileri, yakıt hücreli otobüslerin toplu taşıma sistemlerinde alternatif teknoloji olarak değerlendirilmesi sürecinde potansiyel kullanıcılar için hem teknik uygulanabilirlik hem de mali sürdürülebilirlik açısından kapsamlı bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır (Nasem, 2021).

Uzun Menzilli Batarya Elektrikli Otobüsler (BEB), 12 metre uzunluğundaki standart konfigürasyonlarda 250-660 kWh arasında değişen yüksek kapasiteli batarya sistemleriyle donatılmış olmasına rağmen, tek şarjla yaklaşık 240 kilometre ve altında güvenilir menzil sunabilmektedir. Bu otobüslerin baz model sermaye maliyeti yaklaşık 740.000 ABD doları olup, yüksek kapasiteli bataryaları ve ileri teknolojik özellikleri nedeniyle geleneksel araçlara kıyasla önemli ölçüde daha yüksek yatırım maliyeti gerektirmektedir. Şarj işlemleri genellikle 50-125 kW veya daha yüksek kapasiteli şarj cihazları kullanılarak gerçekleştirilmekte ve operasyonel verimlilik açısından gece saatleri veya öğle molası gibi araçların servis dışında kaldığı zaman dilimlerinde planlanmaktadır. Bu teknik özellikler ve operasyonel sınırlılıklar, uzun menzilli BEB'lerin toplu taşıma sistemlerinde kullanımının menzil gereksinimleri ve operasyonel planlama açısından dikkatli bir değerlendirme sürecini gerektirdiğini göstermekte, özellikle günlük operasyon mesafesi yüksek olan güzergahlar için şarj

altyapısı ve araç rotasyon planlamasının kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır (Nasem, 2021).

Hızlı Şarj Özellikli Batarya Elektrikli Otobüsler (BEB), 12 metre uzunluğundaki standart konfigürasyonlarda 50-250 kWh arası daha kompakt batarya kapasitelerine sahip olup, yeterli sürelerde periyodik şarjlar yapıldığı takdirde pratik anlamda sonsuz menzil sunabilme özelliğine sahiptir. Bu otobüslerin temel sermaye maliyeti 750.000-1.000.000 ABD doları arasında değişmekte olup, hızlı şarj sistemleri ve ileri teknoloji donanımının maliyetini yansıtmaktadır. Şarj işlemleri 150-450 kW veya daha yüksek kapasiteli overhead (üstten temas eden) ya da kablosuz (indüktif) şarj cihazlarıyla gerçekleştirilmekte ve otobüsün hat üzerinde sefer aralarında "on-route" şarj yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu teknolojik yaklaşım, otobüslerin hat üzerindeki hızlı şarj istasyonlarında kısa süreli enerji ikmali yaparak sürekli operasyon gerçekleştirmesini mümkün kılmakta, böylece daha küçük batarya kapasiteleriyle büyük menzil gereksinimlerini karşılayabilmektedir. Bu operasyonel model, geleneksel araçlarla 1:1 oranında değiştirilebilir araç filosu oluşturma imkanı sunarak, toplu taşıma sistemlerinde kesintisiz hizmet sürekliliği sağlarken, aynı zamanda batarya maliyetlerini düşürme ve şarj altyapısının stratejik noktalarda kurulması yoluyla sistem verimliliğini artırma avantajları sağlamaktadır (Nasem, 2021).

Çizelge 4.1. Sıfır Emisyonlu Otobüs (ZEB) Teknoloji Maliyetleri (AC Transit, 2020)

ZEB Teknolojisi	Filo Adedi	Otobüs Maliyeti	Altyapı Maliyeti	Teknoloji Toplamı
Batarya Elektrikli Otobüs	530	\$580.000.000	\$297.000.000	\$880.000.000
Yakıt Hücreli Otobüs	150	\$195.000.000	\$31.000.000	\$226.000.000
TOPLAM	680	\$778.000.000	\$328.000.000	\$1.106.000.000

Kentsel toplu taşıma filosunun tam elektrikli araçlara (%100 ZEB) dönüştürülmesi sürecinin ekonomik değerlendirmesi, 2020 yılı harcama tahminleri temel alınarak gerçekleştirilmiştir. İlgili bölgenin mevcut 45 ZEB dağıtım projesi verilerine dayanan analize göre, tam dönüşüm sürecinin toplam finansal yükü 1,1 milyar ABD doları

olarak hesaplanmıştır. Önceki araştırmalarda öngörülen 696 milyon dolarlık artışsal maliyet projeksiyonunun, her satın alma fazında teknolojik gelişmeler ve pazar dinamiklerinin etkisiyle değişkenlik gösterebileceği ve potansiyel olarak azalma eğilimi sergileyebileceği değerlendirilmektedir. Teknoloji türlerine göre araç tedariki ve büyük ölçekli altyapı yatırımlarının maliyet analizi, mevcut pazar ölçeklenebilirlik verileri çerçevesinde kategorize edilmiştir. Bu kapsamda, 50 batarya elektrikli otobüs (BEB) dağıtımı için gerekli altyapı yatırımı 28 milyon dolar, 200 yakıt hücreli elektrikli otobüs (FCEB) dağıtımı için ise 31 milyon dolar olarak hesaplanmıştır. Bu veriler, farklı elektrikli otobüs teknolojilerinin altyapı gereksinimlerindeki maliyet farklılaşmasını ve ölçek ekonomisinin teknoloji seçimi üzerindeki etkilerini nicel olarak ortaya koymaktadır. Söz konusu bulgular, sürdürülebilir kentsel hareketlilik dönüşümünde teknoloji seçimi ve finansal planlama süreçleri için önemli referans değerleri sunmaktadır (AC Transit, 2020).

Elektrikli otobüs altyapısına geçişte ilk karşılaşılan maliyet kalemi yatırım maliyetleridir. Bu kapsamda, araç temini, şarj altyapısının kurulumu ve elektrik dağıtım altyapısının güçlendirilmesi temel bileşenleri oluşturmaktadır. Yatırım maliyetleri genellikle yüksek başlangıç sermayesi gerektirir ve bu nedenle karar vericiler için önemli bir engel veya planlama kriteridir. Antalya özelinde yatırım maliyetlerini oluşturan unsurlar ve bunların mevcut duruma etkileri aşağıda ayrıntılı olarak incelenmektedir:

Çizelge 4.2. İlk yatırım maliyeti (Nunno, 2018)

Yatırım	Maliyet
Araç Maliyetleri	
12 metre (40 ft) Dizel Otobüs	445.000 \$ (2015 yılı)
12 metre (40 ft) Elektrikli Otobüs	770.000 \$ (2015 yılı)
Dizel Otobüs (Midibüs)	~4.5 milyon TL/araç (2024 başı)
8.5 metre Elektrikli Otobüs	~250.000 € (~5 milyon TL/araç)
Retrofit (dizel otobüsün elektrikliye dönüştürülmesi)	250.000 €
Şarj İstasyonu Maliyetleri	
Yavaş (Gece) Şarj İstasyonu	50-150 kW güç, maliyet belirtilmemiş
Hızlı Şarj İstasyonu	300-450 kW güç ve üzeri
Elektrik Altyapısı Yatırımları	
Güneş Enerjisi Santrali	330 kW güneş enerjisi santrali + 400 kWh batarya depolama sistemi
Trafo, hat çekimi vb.	

Elektrikli otobüslerin birim satın alma maliyeti, geleneksel dizel otobüslere kıyasla hala belirgin ölçüde yüksektir. Çizelge 4.2’de, 12 metre sınıfında tipik bir dizel otobüsün yaklaşık \$450.000 civarında bir maliyeti varken aynı boyuttaki bir elektrikli otobüsün maliyeti \$700.000–800.000 bandında olabilmektedir (Nunno, 2018). Nunno (2018) çalışmasında 2015 yılı itibariyle 40 ft (12 m) bir dizel otobüsün 445 bin \$; benzer uzunluktaki bir bataryalı elektrikli otobüsün ise 770 bin \$ olduğunu bildirmektedir. Her ne kadar sonraki yıllarda batarya teknolojilerindeki gelişmelerle bu fark bir miktar azalmış olsa da, 2020’lerin ortasında da elektrikli otobüslerin ilk alım bedelleri dizel muadillerinin en az %50-70 üzerinde kalmaktadır (Nunno, 2018). Bu yüksek araç maliyetinin en büyük nedeni elektrikli otobüslerdeki batarya paketinin çok pahalı olmasıdır. Nitekim batarya paketi, tipik bir elektrikli otobüsün imalat maliyetinin yaklaşık %30–40’ını oluşturmaktadır (ReportLinker, 2021; Aktaran: Transformative Mobility, 2022). Lityum-iyon batarya teknolojisinin birim fiyatı 2010’dan bu yana %80 ucuzlamış ve 2018 sonrası için de kademeli bir düşüş öngörülmüştür (Nunno, 2018). Ancak yüksek kapasiteli bataryalar halen ciddi bir yatırım tutarı gerektirmektedir. Antalya Büyükşehir Belediyesi’nin ilk etapta sınırlı sayıda elektrikli otobüsü filosuna katarken dış finansman ve hibe olanaklarını değerlendirmesi bu nedenle şaşırtıcı değildir. Nitekim 2019-2023 arasında AB destekli bir proje kapsamında Antalya, 8.5 metrelik 2 adet elektrikli otobüsü ve bunlara ait şarj ünitelerini yaklaşık 500 bin € toplam yatırımla temin etmiştir (EBRD GEFF, 2023). Bu rakam, bir elektrikli otobüsün birim maliyetinin o dönemki kur ve piyasa koşullarında yaklaşık 250 bin € (yaklaşık 5 milyon TL) düzeyinde olduğunu göstermektedir. Karşılaştırma için, Antalya’nın yakın geçmişte satın aldığı 20 adet dizel midibüs için toplam 90 milyon TL (2024 başı fiyatlarıyla) harcadığı, yani araç başına ~4.5 milyon TL maliyet oluştuğu belediye tarafından belirtilmiştir (Antalya Büyükşehir Belediyesi, 2024). Dolayısıyla, birim araç maliyeti açısından elektrikli otobüslerin yüksek sermaye gerektirdiği görülmekte, bu da filonun genişletilmesini bütçe kısıtları altında zorlaştırmaktadır.

Elektrikli otobüslerin operasyonu için gereken şarj altyapısı, dönüşümün önemli bir yatırım bileşenidir. Bu kapsamda otobüslerin park ettiği garajlarda ve/veya güzergâh sonlarında şarj istasyonlarının kurulması gerekmektedir. Şarj istasyonlarının türü ve kapasitesi, yatırım maliyetlerini belirleyen kritik faktörlerdir. Yavaş (gece) şarj istasyonları, her bir otobüsün gece boyunca şarj edilmesine imkân tanıyarak nispeten

düşük güçlü (örn. 50-150 kW) sistemlerdir ve birim maliyetleri daha düşüktür. Buna karşın, hızlı şarj veya fırsat şarjı (opportunity charging) istasyonları yüksek güçlü (300-450 kW ve üzeri, pantograf sistemli vb.) olup birim maliyetleri çok daha yüksektir. Antalya gibi hat uzunluklarının ve günlük kat edilen mesafenin yüksek olduğu bir büyükşehirde, eğer elektrikli otobüsler gün ortasında şarj edilmeden tüm gün hizmet verecekse, her otobüs için yüksek kapasiteli bataryalara yatırım yapmak gerekir ki bu da araç maliyetini arttırmaktadır. Alternatif olarak, daha küçük bataryalı otobüslerle çalışmak ancak güzergâh sonlarında hızlı şarj istasyonları kurmak mümkündür; bu durumda yatırım maliyeti bataryadan altyapıya kaymaktadır. Hangi stratejinin seçileceği Antalya'nın hat yapısına ve günlük taşıma planına bağlıdır. Örneğin, düz bir kampüs içi hatta çalışan Antalya'nın ilk elektrikli otobüsleri için depo merkezine kurulan orta güçlü iki şarj istasyonu yeterli olmuştur (EBRD GEFF, 2023). Ancak tüm kente yaygın bir elektrikli filo için muhtemelen onlarca şarj noktası gerekecektir. Bir hızlı şarj istasyonunun maliyetinin kurulumu ve trafo bağlantılarıyla birlikte on binlerce doları bulabileceği belirtilmektedir (Kenanoğlu ve Aydın, 2018). Ayrıca sıcak iklimlerde şarj istasyonlarının açık alanda kurulması durumunda gölgelendirme ve soğutma ihtiyacı doğabilir; zira üreticiler bazı şarj ekipmanları için ortam sıcaklığı üst çalışma sınırını $\sim 45^{\circ}\text{C}$ civarında belirtmekte, daha sıcak hava koşullarında cihazların performansının düşebileceği uyarısında bulunmaktadır (Joint Office of Energy ve Transportation, 2022). Antalya'da yaz aylarında gölgede bile 40°C 'ye yaklaşan hava sıcaklıkları göz önüne alındığında, şarj altyapısının iklimlendirme gereksinimleri de yatırım planlarına dahil edilmelidir.

Elektrikli otobüs filolarının şebeke bağlantısı, yalnızca şarj ünitelerinin teminiyle sınırlı olmayıp, elektrik altyapısına yapılacak ek yatırımları da gerektirebilir. Antalya gibi büyük bir kentin mevcut elektrik dağıtım şebekesi genel olarak güçlü olmakla birlikte, otobüs garajı veya şarj merkezlerinin bulunduğu noktaya yüksek güçlü besleme hatlarının çekilmesi, trafo merkezi kapasitelerinin artırılması veya yeni transformatör kurulması gerekebilir. Bu tür altyapı yatırımları, yerel elektrik dağıtım şirketi ile koordinasyon içinde planlanmalıdır ve maliyeti ilgili projenin bütçesine yansımaktadır. Özellikle hızlı şarj ünitelerinin yoğun kullanımı durumunda ani yük çekişleri olacak ve bunlar şebekeye ek stres getirecektir. Antalya'nın mevcut otobüs deposunun elektriksel altyapısının, diyelim ki aynı anda 50 otobüsün şarj olacağı bir senaryoyu karşılayıp karşılayamayacağı teknik olarak incelenmelidir. Gerekli

görüldüğünde bu depolara özel orta gerilim hat yatırımı, güç transformatörleri, dağıtım panoları ve hatta enerji depolama sistemleri kurulması gündeme gelebilmektedir. Nitekim Antalya Büyükşehir Belediyesi, MAtchUP projesi kapsamında belediye hizmet binası ve tramvay atölyesi çatısına 330 kW güneş enerjisi santrali ve 400 kWh batarya depolama sistemi kurmuştur; bu sistem, elektrikli araçların şarj edilmesinde kullanılmak üzere temiz enerji sağlamayı hedeflemektedir (Fural, 2019). Böylelikle şarj altyapısının elektrik ihtiyacının kısmen yenilenebilir kaynaklardan karşılanması ve şebeke yükünün dengelenmesi planlanmıştır. Bu tür yatırımlar, ilk sermaye maliyetini artırsa da uzun vadede enerji maliyetlerini düşürerek işletme giderlerine olumlu yansiyabilir. Antalya'nın yüksek güneşlenme potansiyeli (yıllık ortalama 3000 saat civarında güneşlenme) dikkate alınarak, fotovoltaiik paneller + batarya kombinasyonu hem ekonomik hem çevresel açıdan uygun bir yatırım bileşeni olarak değerlendirilmektedir (Antalya Büyükşehir Belediyesi, 2022a).

Yukarıdaki kalemler Antalya için toplam yatırım maliyetinin bileşenlerini oluşturmaktadır. Antalya'nın mevcut toplu taşıma filusunda, özellikle özel halk otobüsleri olarak anılan ve bireysel işletmecilere ait yüzlerce otobüs bulunmaktadır. Belediye Başkanı'nın ifadelerine göre, il genelinde 492 adet halk otobüsü esnafına ait araç bulunmaktadır (Öztopcu ve Salman, 2019). Bu araçların 240 kadarı aktif olarak çalışmakta, geri kalanı ise yedek veya atıl durumdadır (Kuleyin, 2011). Bu veriler, Antalya'da toplu taşıma hizmetinin önemli bir kısmının özel sektör eliyle sağlandığını göstermektedir. Elektrikli otobüs dönüşümünün yatırım maliyetleri planlanırken, sadece belediye mülkiyetindeki otobüslerin değil, orta vadede bu 492 araçlık filonun da kademeli yenilenmesi düşünülmelidir. Bu da yatırım maliyetlerini katlayan bir etkidir. Belediyenin doğrudan işletmediği bu hatlarda dönüşümü sağlamak için ya belediye tarafından yeni elektrikli otobüs yatırımları yapılarak bu hatların devralınması ya da özel işletmecilerin elektrikli araç satın almasını teşvik edecek hibe ve kredi mekanizmalarının devreye sokulması gerekebilir. Türkiye genelinde 11. Kalkınma Planı (2019) ve 12. Kalkınma Planı (2023) gibi üst politika belgelerinde, şehir içi toplu taşımada yerli elektrikli otobüs kullanımının yaygınlaştırılması için devlet desteklerinin sağlanacağı vurgulanmıştır (Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019; 2023). Bu çerçevede Antalya, ulusal fonlar veya uluslararası finansman (AB hibeleri, kalkınma bankaları vb.) kullanarak yüksek yatırım maliyetlerini düşürme yoluna gidebilir. Örneğin, EBRD ve AB destekli finansmanla

temin edilen 2 elektrikli otobüs, Antalya için önemli bir pilot yatırım olmuştur (EBRD GEFF, 2023). İstanbul’da yakın dönemde uygulanan bir proje ise alternatif bir yatırım stratejisine işaret etmektedir: mevcut dizel otobüslerin elektrikliye dönüştürülmesi (retrofit). İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2006 model kullanım ömrünü tamamlamış bir dizel otobüsü 250 bin € maliyetle elektrikli hale getirmiş, bunun yeni bir elektrikli otobüs almak yerine yaklaşık %50 maliyet tasarrufu sağladığını duyurmuştur. Bu dönüşüm, araç başına yıllık 1,13 milyon TL yakıt tasarrufu potansiyeli de sunmaktadır (Ulusoy, 2017). Antalya için de filoda ekonomik ömrünü doldurmaya yakın otobüsler varsa, benzer dönüşüm yaklaşımı fizibilite etüdleri yapılabilir. Ancak retrofit işlemlerinin de yüksek mühendislik kapasitesi ve garanti/güvenilirlik konuları göz önüne alındığında dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir.

Özetle, yatırım maliyetleri kapsamında yüksek araç alım bedelleri, şarj altyapısı kurulumu ve elektrik şebekesi yatırımları Antalya özelinde dikkate alınması gereken kalemlerdir. Antalya’nın büyüklüğü ve turistik bir metropol oluşu, gerekli araç sayısını ve altyapı kapasitesini artırmaktadır. Bununla birlikte, güneş enerjisi gibi yerel yenilenebilir potansiyellerin entegrasyonu ve olası finansman destekleri, yatırım maliyetlerinin uzun vadeye yayılmasında ve azaltılmasında kritik rol oynayacaktır. Elektrikli otobüslere geçişin başarısı, sadece ilk yatırımın yapılmasına değil, işletme dönemi maliyetlerinin sürdürülebilir olmasına da bağlıdır. İşletme maliyetleri, araçların günlük kullanımından ve hizmetin devam ettirilmesinden kaynaklanan giderleri kapsamaktadır. Antalya şartlarında, elektrikli toplu taşıma işletmesinin maliyet boyutu, dizel otobüs işletmesi ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Bu alt başlık altında, enerji tüketimi maliyetleri, personel ve eğitim giderleri, filo işletim planlaması ve Antalya’nın mevsimsel koşullarının işletmeye etkileri gibi unsurlar ele alınmıştır.

Elektrikli otobüslerin en önemli işletme avantajlarından biri, birim enerji maliyetlerinin dizel yakıta kıyasla daha düşük olmasıdır. Elektrik ile araç işletmenin, fosil yakıt kullanımına göre yaklaşık 2–3 kat daha ucuza geldiği çeşitli çalışmalarda ortaya konmuştur (Nunno, 2018). Bu durum, elektrik motorlarının yüksek veriminden ve şebeke elektriğinin birim enerjisinin dizel yakıta oranla ucuz olmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) verilerine göre, elektrikli otobüslerin km başına enerji maliyeti, dizel otobüslere

kıyasla yaklaşık %60 daha düşük bulunmuştur (Eudy vd., 2016). Türkiye özelinde de benzer bir tablo söz konusudur. Antalya Büyükşehir Belediyesi'nin danışmanlarından Lokman Atasoy, elektrikli otobüslerin dizel otobüslere kıyasla tüketim maliyetinin üçte bir oranında daha az olduğunu ifade etmiştir (Atasoy, 2023). Bu, bir diğer deyişle elektrik enerjisiyle çalışan bir otobüsün km başına yakıt giderinin, dizel aracın sadece %33'ü seviyesinde kaldığını göstermektedir. Nitekim İstanbul'da yapılan dönüşüm projesinde de bir otobüsün yıllık yakıt maliyetinin dizelden elektriğe geçiş sayesinde 1,13 milyon TL azaltılabildiği rapor edilmiştir (Pınarcıoğlu ve Kanbak, 2020). Antalya'da dizel yakıt fiyatlarının ve elektrik tarifelerinin seyri de bu orana etki edecektir. Son yıllarda Türkiye'de enerji maliyetlerinde dalgalanmalar olsa da genel olarak elektrik fiyatları daha istikrarlı ve yerli kaynaklara dayalı üretim arttıkça görece olarak uygun kalmaktadır. Antalya özelinde önemli bir avantaj, belediyenin öz tüketim amaçlı güneş enerjisi yatırımlarıyla otobüslerin şarj elektriğini kısmen kendi üretmesidir. Antalya Ulaşım A.Ş. hizmet binası ve otogar çatısına kurulan güneş enerji santralleriyle elektrikli otobüslerin enerji ihtiyacını karşılayıp yakıt maliyetini sıfıra indirmeyi hedeflediklerini belirtilmiştir. Bu hedef tam anlamıyla gerçekleşmese bile, şebekeden çekilen elektrik miktarının azaltılması yoluyla önemli bir işletme gideri kalemi aşağı çekilebilir. Öte yandan, elektrikli otobüslerin enerji maliyet avantajı talep ücretleri veya yoğun saat elektrik tarifeleri nedeniyle kısmen dengelenebilir. Şöyle ki, çok sayıda otobüsün aynı anda şarj edilmesi halinde elektrik şebekesi işletmecisi tarafından uygulanan demand charge benzeri yüksek çekiş bedelleri söz konusu olabilir (Güner, 2013). Bu durum, özellikle gün ortasında hızlı şarj yapıldığında ortaya çıkar. Antalya'da şarj stratejisi mümkün olduğunca gece saatlerine ve kendi üretim saatlerine kaydırılarak, ulusal tarife avantajları ve düşük yük zamanları değerlendirilebilir. Kısaca, enerji tüketim maliyetleri elektrikli otobüsler lehine önemli avantaj sağlamakla birlikte, akıllı şarj yönetimi ve üretim-tüketim optimizasyonu ile bu avantaj en üst düzeye çıkarılmalıdır.

Toplu taşıma işletme maliyetlerinde enerji kadar insan kaynağı maliyetleri de belirleyicidir. Elektrikli otobüslere geçiş, sürücüler ve bakım personeli açısından yeni eğitim programlarını gerektirmektedir. Sürücü eğitimi, elektrikli araçların farklı ivmelenme karakteristiği, rejeneratif frenleme kullanımı, enerji verimliliği prensipleri ve şarj prosedürleri gibi konuları içermektedir. Üretici firmalar genellikle otobüs teslimatında sürücü eğitimleri sunsa da, Antalya gibi büyük bir filoda tüm şoförlerin

bu yeni teknolojiyi verimli kullanacak şekilde eğitilmesi zaman ve maliyet gerektirecektir. Eğitim maliyetleri arasında simülasyon eğitimleri, atölye çalışmaları ve belgelendirme yer alabilmektedir. Bunun yanında, acil durum ve güvenlik eğitimleri de önemlidir; zira yüksek voltajlı bataryalarla çalışmak, yangın veya arıza durumunda farklı protokoller gerektirmektedir. Antalya'nın turizm sezonunda yaşadığı bir sorun, tecrübeli otobüs şoförlerinin daha yüksek gelirli turizm taşımacılığı sektörüne kaymasıdır (Cumhuriyet, 2025). Nitekim turizm sezonunun açılmasıyla birlikte birçok şoförün turistik taşımacılığa geçtiği, belediyenin toplu taşıma için şoför bulmakta zorlandığı ve aylık 17 bin TL maaş teklifine rağmen şoför açığı yaşandığı belirtilmiştir (Cumhuriyet, 2025). Bu durum, işletme maliyetlerini dolaylı da olsa etkileyen önemli bir faktördür. Yaz aylarında toplu taşıma talebi artarken, işgücü maliyetleri de artabilmektedir. Elektrikli otobüsler açısından, belki araçların teknolojik yenilik unsuru cazip gelerek sürücülerini kamu taşımacılığında tutmaya yardımcı olabilir; fakat esas çözüm ücret ve çalışma koşullarının düzenlenmesidir. Antalya Büyükşehir Belediyesi, artan talebi karşılamak ve şoför açığını gidermek için yaz aylarında geçici personel istihdamı veya mesai ödemelerini artırmak gibi tedbirler almak zorunda kalabilir. Bu da işletme bütçesine ek yük getirecektir. Kısaca, elektrikli otobüs işletmesinde personel giderleri, dizel otobüslere kıyasla doğrudan azalmasa da (hatta yeni eğitimler nedeniyle başlangıçta bir miktar artacaktır), uzun vadede benzer seviyede seyretmesi beklenmektedir. Sadece sürücü değil, bakım personelinin de yüksek voltaj sistemleri ve batarya teknolojisi konularında eğitimi şarttır. Bu bağlamda işletme döneminde periyodik hizmet içi eğitim maliyetleri planlanmalıdır.

Elektrikli otobüslerin günlük işletimi, dizel araçlara göre bazı operasyonel farklar içerir ve bu farklar maliyet ile verimlilik boyutunda değerlendirilmelidir. Öncelikle, menzil kısıtı elektrikli filonun planlamasında ana belirleyicidir. Antalya, coğrafi olarak geniş bir alana yayılmış, merkezi ilçeleri dışında kırsal ilçelere kadar uzanan bir toplu taşıma ağına sahiptir. Şehir merkezi ve yakın ilçelerdeki hat uzunlukları tipik olarak bir tur için 20-30 km'yi bulabilmektedir. Günde yaklaşık 200-300 km yapan hatlar mevcuttur. Elektrikli bir otobüs, tam şarjla ideal koşullarda yaklaşık 200-250 km menzil sunabilir; ancak gerçek koşullarda bu değer iklim ve yol durumuna göre daha düşük olacaktır. Antalya'nın yaz sıcağında sürekli klimalı çalışma zorunluluğu, menzili ciddi biçimde azaltabilir. Araştırmalar, sıcak iklimlerde yoğun klima kullanımının elektrikli otobüslerin menzilin %25'e varan oranlarda düşürebileceğini

ortaya koymaktadır. Bu durumda 250 km nominal menzile sahip bir otobüs, Antalya’da yazın belki 180 km gidebilecektir. Dolayısıyla işletim planlamasında, otobüslerin gün ortasında şarj için çekilmesi veya rotasyonunun ayarlanması gerekebilir. Eğer gün içinde şarj için araç servisten çekilirse, aynı hatta ikinci bir araç koymak gerekecektir ki bu ek araç yatırımını veya en azından yedek araç ihtiyacını gündeme getirmektedir. Bu da dolaylı bir maliyet unsurudur: Yeterli sayıda yedek elektrikli otobüs bulundurmak veya filo büyüklüğünü arttırmak. Antalya’da turizm sezonunda talep patlaması yaşanan belirli hatlar (örneğin havalimanı şehir merkezi hatları, sahil bölgelerine giden hatlar) bulunmaktadır. Bu hatlarda yüksek yolcu talebini karşılamak için sıklık artırılır veya ek seferler konmaktadır. Elektrikli otobüslerin bu yoğun tempoya ayak uydurabilmesi için şarj sürelerinin işletim programına uygun şekilde entegre edilmesi şarttır. Hızlı şarj molaları planlanırken, bu istasyonların doluluk durumu ve sırada bekleme süreleri de hesaba katılmalıdır. Aksi halde, bir hatta planlanan otobüs sayısını artırmak (dolayısıyla sürücü ve enerji maliyetini de artırmak) gerekebilir. İşletim planlamasının karmaşılaşması, bir ölçüde gelişmiş flotasyon yönetim yazılımları ve akıllı şarj planlayıcıları ile çözülebilir; ancak bunlar da ek maliyet kalemleridir. Antalya Ulaşım A.Ş.’nin mevcut elektronik bilet ve filo takip sistemi, elektrikli otobüslerin şarj durumunu da kapsayacak şekilde güncellenmelidir. İşletme maliyetleri bağlamında, bu tür dijital altyapı iyileştirmeleri ve yazılım lisans giderleri de göz önüne alınmalıdır.

Son olarak, Antalya gibi turistik bir kentte talebin gün içinde ve yıl içinde dalgalanması işletme maliyet optimizasyonunu zorlaştırmaktadır. Yaz sezonunda neredeyse kapasitenin tamamı kullanılırken, kışın bazı otobüsler atıl kalabilir. Elektrikli otobüslerin atıl kaldığı dönemde de bataryaların düzenli şarj-deşarj döngülerinin yapılması, belirli periyotlarla çalıştırılması gerekmektedir (üretici tavsiyeleri). Bu da küçük de olsa bir enerji tüketimi ve bakım gereksinimi yaratmaktadır. Örneğin, Akdeniz Üniversitesinde ücretsiz hizmet veren elektrikli kampüs otobüsleri, yaz tatilinde öğrenciler olmadığında dahi aralıklı çalıştırılmak durumundadır; aksi halde uzun süre hareketsiz kalan bataryalarda kalibrasyon sorunları veya derindeşarj problemleri oluşabilmektedir. Bu gibi operasyonel hususlar, işletme süreçlerinde dikkat edilmesi gereken ve gerektiğinde üreticilerden teknik destek alınmasını gerektiren konulardır. Teknik destek veya danışmanlık hizmetleri de işletme gideri olarak bütçelenmelidir.

Özetle, elektrikli otobüs filosunun işletme maliyetleri Antalya için enerji, insan kaynağı ve operasyon planlaması boyutlarında incelendiğinde, enerjide belirgin bir tasarruf potansiyeli olduğu, ancak operasyonel planlamanın titizlik istediği görülmektedir. Enerji maliyet avantajı, doğru yönetildiğinde Antalya'nın toplu taşıma bütçesine olumlu yansıyacaktır. Özellikle dizel fiyatlarının yüksek seyrettiği dönemlerde elektrikli filonun ekonomik avantajı artar. Antalya'nın iklimi ve turizm sezonu ise, işletme maliyetlerinde dalgalanmalara yol açsa da, bunlar öngörülebilir dalgalanmalardır ve iyi bir planlama ile yönetilebilir.

4.3.1.2. Bakım ve onarım maliyetleri

Elektrikli otobüslerin uzun vadeli maliyet yapısında bakım ve onarım giderleri kritik bir paya sahiptir. Geleneksel dizel otobüslerde bakım maliyetleri genellikle motor, şanzıman, egzoz sistemleri, yağ ve filtre değişimleri, fren balataları, lastikler vb. üzerinden şekillenirken; elektrikli otobüslerde içten yanmalı motor olmaması nedeniyle bakım ihtiyaçları farklılaşır. Bu alt bölümde, batarya değişim maliyetleri, bakım altyapısı ve ekipmanı, yedek parça ve parça tedarik zinciri ve Antalya'nın çevresel koşullarının bakım üzerine etkisi detaylı olarak incelenmektedir.

Elektrikli otobüslerin en pahalı donanımı olan batarya paketi, aynı zamanda sınırlı bir ömre sahiptir. Lityum-iyon bataryaların performansı zamanla düşer ve genelde kullanım ömrü 7-10 yıl olarak öngörülmektedir. Çoğu üretici, batarya kapasitesinin %70'in altına düştüğünde otobüslerin operasyonel verimliliğinin önemli ölçüde azalacağını ve batarya değişiminin gündeme geleceğini belirtmektedir. Bu da pratikte, filodaki elektrikli otobüslerin bataryalarının yaklaşık 8-10 yıl sonra yenilenmesi gerekeceği anlamına gelmektedir. Batarya yenileme maliyeti, otobüsün ilk yatırım maliyetinin çok önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Nitekim bataryalar toplam araç maliyetinin ~%40'ına kadar çıktığına göre (ReportLinker, 2021), tek seferde onlarca otobüsün bataryasını değiştirmek belediye bütçesine çok ciddi bir yük getirebilir. Antalya ölçeğinde örnek bir senaryo ile bu durumu somutlaştıralım: Diyelim ki Antalya 2030 yılına kadar 100 adet elektrikli otobüsü hizmete soktu. Bu otobüslerin 2030'da devreye girenlerinin batarya değişimi 2038- 2040 civarında gerekecek. Eğer bir otobüsün batarya yenileme maliyeti o günün fiyatlarıyla 150 bin € (bugünün değeriyle ~4 milyon TL) tutarsa, 100 otobüs için toplu yenileme maliyeti 15 milyon €

(400 milyon TL) (Kur dönüşümlerinde Metin içi örnek: "Kur dönüşümünde, 1 € = 43.4914 TL kullanılmıştır (TCMB, 25.04.2025) gibi çok yüksek bir rakama ulaşabilir. Bu nedenle, batarya yenileme stratejisi bakım maliyetleri planlamasının merkezinde yer almalıdır. Bazı filolar, batarya ömrünü uzatmak için yüksek kapasiteli bataryaları daha düşük deşarj döngülerinde kullanma veya ara şarjlarla derin deşarjdan kaçınma gibi yöntemler izlemektedir (Karlı, 2023). Antalya'da da yoğun sezon dışında otobüslerin batarya kullanım döngülerini rahatlatmak mümkün olabilmektedir. Ayrıca, değiştirilmiş eski bataryaların ikinci ömür kullanım (örneğin şebeke enerji depolamada) projeleri de değerlendirilebilir, böylece ilk yatırımın bir kısmı geri kazanılabilir. Ancak neticede, batarya değişimi yüksek bir bakım harcaması kalemi olarak bütçede yerini alacaktır. Bu harcama, işletme döneminde beklenen ve amortisman planlarına dahil edilmesi gereken bir giderdir. Eğer Antalya Büyükşehir Belediyesi, batarya değişim maliyetini önceden öngörerek bir yenileme fonu oluşturursa, ilgili yılda bütçeye ani yük bindirmeden bu süreci yönetebilir.

Elektrikli otobüsler, mekanik olarak daha basit güç aktarma organlarına sahip olduğundan, düzenli bakım gereksinimleri belirli açılardan azaltmaktadır. Örneğin, yağ değişimi, motor bakım/onarımı gibi kalemler ortadan kalkmaktadır. Bununla birlikte, pratikte filo işletmeciliğinde bakım maliyetlerini sadece motor karşılaştırması üzerinden ele almak yeterli değildir. Fren sistemleri elektrikli otobüslerde rejeneratif frenleme sayesinde daha az aşınır da, yine de hidrolik/pnömatik aksam bakımı devam etmektedir. Süspansiyon, direksiyon, klima, kapı mekanizmaları gibi ortak komponentlerin bakım ihtiyacı değişmez. Dahası, yüksek voltaj sistemleri ve soğutma sistemleri (batarya ve invertörleri için) yeni bakım kalemleri olarak devreye girmektedir. Elektrikli otobüslerin bakımını üstlenecek atölyelerin uygun şekilde teknolojik dönüşümü şarttır. Antalya'da halihazırda belediyenin atölyeleri daha çok dizel araçlara göre düzenlenmiştir; buralara yüksek voltaj bakım ekipmanları (izolasyon ekipmanları, özel kaldırma aparatları), tanı cihazları (diagnostics) ve bakım personelinin güvenliği için özel teçhizat temin edilmelidir. Bu altyapı dönüşümü de önemli bir maliyet bileşenidir ancak genellikle ilk yatırım bütçesine dahil edilebilir. Yine de, işletme sürecinde bakım atölyesi işletim giderleri artabilir; örneğin atölyede güçlü havalandırma ve iklimlendirme sistemleri, batarya depolama alanları, yangın güvenlik sistemleri (lityum yangınlarına uygun) kurulması gerekecektir. Antalya'nın sıcak iklimi, atölye ortamında batarya tamir/bakım işlemleri yapılırken sıcaklık

kontrolünü kritik hale getirmektedir. Bu da bakım tesisinin işletme giderleri kapsamında enerji tüketimini artırabilir. Teknik servis altyapısının bir diğer boyutu, mobil bakım ekipleri ve yol yardımıdır. Dizel araçlarda yakıt bitmesi durumunda sahada yakıt ikmali yapılabilirken, elektrikli otobüslerde beklenmedik durumlarda yolda kalan aracın çekilmesi veya mobil şarj aracıyla desteklenmesi gibi operasyonlar söz konusu olabilir. Antalya gibi geniş bir coğrafyada, elektrikli otobüsler için yedek mobil jeneratör veya mobil şarj ünitesi bulundurulması iyi bir uygulama olabilir, bu da bakım filosunun bir parçası olarak yatırım ve işletme maliyetine yansımaktadır.

Elektrikli otobüs teknolojisi henüz yaygınlık kazanma aşamasında olduğundan, yedek parça temini konusunda bazı belirsizlikler ve yüksek maliyetler söz konusu olabilir. Özellikle batarya modülleri, güç elektroniği birimleri (invertör, konvertör), elektrik motoru bileşenleri, yüksek voltaj kabloları gibi parçaların arıza durumunda temini, dizel motor parçalarına göre daha uzun süre ve daha yüksek maliyetle gerçekleşebilir. Antalya, ulaşım filosu için genelde yerli üreticilerden (Temsa, Otokar, BMC, Karsan gibi) otobüs tedarik etmektedir. Türkiye’de elektrikli otobüs üretimi yapan yerli firmalar bulunduğu (örneğin Temsa’nın elektrikli Avenue modeli, Bozankaya ve ASELSAN’ın ortak geliştirdiği e-bus projeleri vb.), Antalya’nın tedarik zinciri avantajı olabilir. Yerli üretici tercih edilirse, yedek parça erişimi daha hızlı ve TL bazında maliyetler daha öngörülebilir olacaktır. Ancak henüz Türkiye’de elektrikli otobüslerin geniş bir yedek parça piyasası oluşmadığı için, üreticiye bağımlılık yüksek kalacaktır. Bu da bakım maliyetlerinde esneklik bırakmaz; yıllık bakım anlaşmaları veya garanti kapsamı dışında kalan onarımlarda tekel konumundaki üreticilerin yedek parça fiyatları belirleyici olacaktır. Bakım maliyetlerini kontrol altında tutmak için Antalya Büyükşehir Belediyesi, mümkün olduğunca toplu bakım anlaşmaları yapabilir. Örneğin, batarya için 8 yıl garanti ve bu sürede kademeli kapasite garantisi, belirli kritik parçalar için 5-6 yıllık uzun vadeli yedek parça temin sözleşmeleri gibi yöntemler düşünülebilir. Ayrıca, filonun tümünü aynı model veya sınırlı sayıda modelle standartlaştırmak, yedek parça stok yönetimini kolaylaştırır ve maliyetleri düşürmektedir. Antalya’nın coğrafi olarak geniş bir alana yayılmış olması, bazı uzak ilçelerde araç arızası durumunda parça ve uzman teknisyen ulaştırmayı gerektirebilmektedir. Bu nedenle, örneğin Alanya gibi kentin doğu ucunda ve Kumluca/Finike gibi batı ucunda bölgesel bakım istasyonları kurulması gündeme gelmektedir. Bu istasyonlar küçük ölçekli de olsa ek bakım personeli ve araç-gereç

yatırımı demektir. Ancak bu sayede ana bakım merkezine (Antalya şehir merkezinde) olan bağımlılık azalacak ve arıza durumlarında hizmet kesintisi süresi kısılacaktır. Özellikle turizm bölgelerinde sezonda araç arızası kaynaklı hizmet aksamalarının hızlı giderilmesi, hem yolcu memnuniyeti hem de belediyenin imajı açısından kritik olacaktır.

Antalya, Akdeniz iklimine sahip olup yazları çok sıcak ve nemli, kışları ılık ve yağışlı geçmektedir. Bu iklim koşulları, elektrikli otobüslerin bazı komponentlerinin ömrünü ve bakım ihtiyacını etkileyebilir. Örneğin, yüksek sıcaklık ve nem, batarya kimyası üzerinde olumsuz etki yapabilir ve batarya termal yönetim sistemlerinin daha yoğun çalışmasını gerektirebilir. Yazın sürekli çalışan batarya soğutma sistemleri (sıvı soğutma devreleri, fanlar vs.), bu dönemlerde daha sık bakım veya parça değişimi gerektirebilir. Benzer şekilde, klimanın sürekli yüksek kapasitede kullanımı, kompresör ve ilgili elektrik elektronik bileşenlerde daha sık bakım ihtiyacı doğurabilir. Antalya'nın deniz kıyısındaki hatlarında tuzlu nemli hava koşulları, elektronik devrelerde korozyon riskini artırır; bu da konnektörlerin, PCB'lerin iyi yalıtılmaması durumunda arızalara yol açabilir. Bu nedenle, deniz kenarında çalışan otobüslerin belirli aralıklarla elektronik aksamalarının kontrol edilmesi önem kazanacaktır. Ayrıca, yaz aylarında tatil bölgelerinde ince kum, toz gibi çevresel etkenler de araçların filtrelerini ve soğutma kanallarını etkileyebilir; dolayısıyla hava filtrelerinin temizliği/değişimi gibi bakım kalemleri ihmal edilmemelidir. Antalya'nın kışları ılık geçse de, özellikle yüksek rakımlı kırsal bölgelerde (Toroslar yamaçlarında) zaman zaman soğuk hava ve hatta don olayları görülebilir. Çok düşük sıcaklıklar batarya performansını geçici olarak düşürse de, Antalya'da bu durum nadir ve kısa süreli olduğu için bakım açısından büyük bir sorun yaratması beklenmez; ancak otobüslerin soğuk gecelerde şarjda iken batarya ısıtma özelliği varsa, bunun enerji tüketimi ve ekipman ömrü etkisi göz önüne alınmalıdır. Son olarak, Antalya'nın turistik ve kalabalık şehir merkezinde araçların sık dur-kalk yapması fren ve süspansiyon aksamını zorlar. Elektrikli otobüsler rejeneratif frenlemenin çoğunu karşıladığı için mekanik fren balataları daha uzun ömürlü olsa da, süspansiyon elemanları ve lastikler aynen dizel araçlardaki gibi aşınacaktır. Hatta elektrikli otobüslerin batarya ağırlığı nedeniyle toplam ağırlığı biraz daha yüksek olabildiğinden, lastik ve süspansiyon aşınması benzer veya bir miktar fazla bile olabilir. Bu da ilgili parçaların yenilenme sıklığını belirlerken dikkate alınmalıdır.

Genel olarak bakım maliyetleri değerlendirmesinde, literatürde elektrikli otobüslerin km başına bakım giderlerinin dizel muadillerine yakın ya da biraz altında olduğu yönünde yaygın bir varsayım bulunmakla birlikte, gerçek saha verileri karma bir tablo çizmektedir. Örneğin, ABD’de bir filo üzerinde yapılan incelemede elektrikli otobüslerin bakım maliyetlerinin başlangıçta düşük seyrettiği, ancak yıllar geçtikçe bazı arızalar ve parça temin zorlukları nedeniyle km başına 0,56 \$ gibi beklenenden yüksek bir değere ulaştığı, aynı koşullardaki CNG (sıkıştırılmış doğalgaz) otobüslerin bakım maliyetinin 0,32 \$/km olduğu rapor edilmiştir. Bu farkın büyük ölçüde beklenmedik arızalar, yedek parça bulunamaması yüzünden uzun araç yatış süreleri ve garanti kapsamı dışı kalan işleri içermesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Dolayısıyla Antalya gibi ilk kez elektrikli otobüs filosu işleyecek bir belediyenin de, başlangıç döneminde benzer sürprizlerle karşılaşma olasılığı vardır. Bu risk, pilot uygulamalarla (küçük ölçekli filolarla başlama) ve üreticiyle yakın işbirliği içinde yönetilebilir. Antalya’nın iki adetlik pilot filosu bu açıdan değerli deneyimler sağlamıştır. Edinilen tecrübeler ışığında, tam ölçekli filonun bakım ihtiyaçları daha iyi öngörülebilir. Örneğin, Antalya’da kullanılan elektrikli otobüslerin yıllık 200 ton karbon emisyonunu azalttığı rapor edilirken (Hamurcu, 2023), aynı araçların bakım performansı da izlenecektir. İlk iki aracın bakım kayıtları, sonraki alımlarda tercih edilecek marka/model konusunda da yol gösterici olabilir. Uzun vadede ise, Antalya Büyükşehir Belediyesi’nin toplam sahip olma maliyeti yaklaşımıyla (TCO - Total Cost of Ownership) yatırım + işletme + bakım maliyetlerini birlikte optimize eden bir planlama yapması gerekir. Bakım maliyetlerinin öngörülenden yüksek seyretmesi durumunda, toplam maliyet avantajı beklenen seviyenin altına düşebilir. Bu nedenle, bakım süreçlerinin sürekli iyileştirilmesi, personel eğitimi, yedek parça stok yönetimi ve tedarikçi performans takibi gibi konular, Antalya’da elektrikli otobüs dönüşüm projesinin başarısı için kritik olacaktır.

4.3.2. Fayda bileşenleri: emisyon azaltımı, enerji tasarrufu, sağlık ve sosyal faydalar

Elektrikli otobüslere geçiş, kent içi ulaşımında çevresel ve sosyal faydalar sağlaması nedeniyle sürdürülebilir kentsel hareketlilik stratejilerinin merkezinde yer almaktadır. Özellikle Antalya gibi hızlı büyüyen ve turizm odaklı şehirlerde, fosil yakıtlı toplu taşıma araçlarının elektrikli araçlarla değiştirilmesi; karbon emisyonlarının

azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve halk sağlığının korunması açısından kritik önemdedir. Bu bölümde, Antalya ili özelinde elektrikli otobüslerin emisyon azaltımı, enerji tasarrufu, kentsel hava kalitesi ve halk sağlığı ile gürültü kirliliğinin azaltılması ve sosyal faydalar boyutundaki katkıları doktora düzeyinde ayrıntılı olarak incelenmektedir. Antalya'nın iklimsel ve coğrafi koşulları, yoğun turizm sezonları, demografik yapısı ve mevcut ulaşım sistemi göz önüne alınarak, elektrikli otobüslerin bu faydaları en üst düzeye nasıl çıkarabileceği tartışılmaktadır.

4.3.2.1. Emisyon Azaltımı

Elektrikli otobüsler kullanım sırasında sıfır egzoz emisyonu üreterek karbon dioksit (CO_2) başta olmak üzere kent içi sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Antalya Büyükşehir Belediyesi'nin iklim eylem planına göre, 2019 itibariyle ulaştırma sektörü Antalya'nın toplam sera gazı salımlarının yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır. Dolayısıyla, otobüs filosunun elektrikliye dönüşümü, Antalya'nın 2030 yılı için hedeflenen %40 emisyon azaltımına katkı sunacak kritik bir adımdır. Nitekim Antalya'daki pilot uygulamalar, iki adet elektrikli otobüsün yılda ~47 ton CO_2 tasarrufu sağladığını göstermiştir. Bu değer, tipik bir dizel otobüsün yıllık emisyonlarının tamamen ortadan kalkması anlamına gelmektedir. İzmir örneğinde de 20 adet elektrikli otobüsün devreye alınmasıyla yıllık ~420 ton CO_2 emisyonunun önlendiği raporlanmıştır (Antalya Belediyesi, 2025a). Bu veriler, büyük ölçekli filo dönüşümlerinde elektrikli otobüslerin toplam sera gazı emisyonlarını binlerce ton azaltabileceğine işaret etmektedir.

Elektrikli otobüslerin yalnızca karbon değil, aynı zamanda azot oksitler (NO_x) ve partikül madde (PM) gibi yerel hava kirleticileri de ortadan kaldırdığı vurgulanmalıdır. Dizel motorlu otobüsler, şehir merkezlerinde NO_x ve $\text{PM}_{2.5}$ kirliliğinin başlıca kaynaklarından ve bu kirleticiler fotokimyasal smog oluşumu, asit yağmurları ve solunum yolu hastalıkları ile yakından ilişkilidir. Elektrikli otobüslerin kullanımında egzoz borusu olmadığından bu kirleticiler kaynağında engellenmektedir. Örneğin Çin'in Shenzhen kenti, tüm otobüs filosunu elektrikli hale getirerek yılda on binlerce ton karbon emisyonunu engellemiş ve kent sakinlerinin hava kalitesinde belirgin iyileşmeler elde etmiştir (Shenzhen örneği). Benzer şekilde, Avrupa'da elektrikli otobüs kullanımının yaygınlaşması, şehirlerin karbondioksit emisyonlarını azaltarak

iklim değişikliğiyle m¼cadelede önemli bir rol oynayacağını ortaya koymaktadır. Antalya'nın yıl boyu güneşli iklimi sayesinde, elektrikli otob¼slerin şarjı için kullanılacak elektriğin yenilenebilir kaynaklardan karşılanma potansiyeli de yüksektir. Güneş enerjisi santrallerinin entegrasyonu ile şebekeden çekilen elektriğin karbon yoğunluğu azaltılabilir; nitekim İzmir'de otob¼s şarjına tahsis edilen bir güneş enerjisi santrali sayesinde önemli oranda emisyon azaltımı gerçekteşmiştir.

4.3.2.2. Enerji verimliliği ve yakıt tasarrufu

Elektrikli otob¼slerin dikkat çeken bir diğer faydası, yüksek enerji verimliliği ve buna bağlı olarak enerji tasarrufu sağlamalarıdır. İçten yanmalı motorlu (dizel veya LPG'li) otob¼slerde yakıtın tekerleklere iletilmesindeki verimlilik kayıpları yüksektir; motor, şanzıman ve aktarma organlarındaki kayıplar dahil edildiğinde bu araçların “yakıttan-tekerleğe” enerji verimi genellikle %20-30 aralığındadır. Buna karşın elektrikli bir otob¼ste bataryadan elektrik motoruna ve oradan tekerleğe kadar enerji dönüşüm verimi %70-80'leri bulmaktadır. Bu temel fark, aynı taşıma hizmeti için çok daha az birincil enerji tüketimi anlamına gelmektedir. Nitekim dizel motorlu bir otob¼s 100 km'de ortalama 30-40 litre yakıt tüketirken, benzer bir elektrikli otob¼s ancak ~5-6 litre dizel eşdeğeri enerji harcamaktadır. Bu dramatik fark, elektrikli otob¼slerin birim mesafe başına enerji ihtiyacını %80'e varan oranlarda azalttığını göstermektedir (Aliustaoğlu, 2019).

Enerji verimliliğindeki bu iyileşme, pratikte yakıt maliyetlerinde büyük tasarruf olarak yansımaktadır. şebeke elektriğinin birim enerji maliyeti, dizel yakıtı kıyasla çok daha düş¼ktür. Bir değerlendirmede, elektrikli otob¼slerin yakıt maliyetinin dizel otob¼slerin yaklaşık onda biri düzeyinde olduğu belirtilmiştir. İzmir'de elektrikli otob¼s filosunun işletimi, geleneksel dizel otob¼slere kıyasla %84 oranında yakıt maliyeti tasarrufu sağlamıştır. Bu denli yüksek tasarruf oranları, elektrikli otob¼slerin uzun vadede ekonomik olarak da avantajlı olabileceğini ortaya koymaktadır. Antalya özelinde, otob¼slerin yoğun olarak çalıştığı yaz aylarında elektrikli araçlar klima kullanımından dolayı ek enerji tüketimi getirir de, gece şarjları ve rejeneratif frenleme ile bu tüketim optimize edilebilir. Rejeneratif frenleme teknolojisi sayesinde elektrikli otob¼sler, sık dur-kalk trafikte ve duraklamalarda açığa çıkan frenleme enerjisini geri kazanarak bataryalarında depolar. Ayrıca trafik ışıklarında veya yolcu indirip bindirme

esnasında elektrik motoru enerji tüketmez, oysa dizel motorlar rölantide yakıt yakmaya devam eder. Bu özellikler, şehir içi yoğun trafikte elektrikli otobüslerin boş enerji harcamasını en aza indirmektedir. Antalya kent merkezi ve turistik bölgelerde yaz sezonunda sıkışık trafikte bu avantaj belirgin hale gelecek, özellikle durak sayısının fazla olduğu hatlarda enerji verimliliği dizel araçlara göre çok daha yüksek olacaktır.

Yüksek enerji verimliliği aynı zamanda işletme ve bakım maliyetlerine de olumlu yansımaktadır. Elektrikli otobüslerde daha az hareketli parça bulunması ve elektrik motorlarının daha az aşınma gerektirmesi, bakım masraflarını azaltma potansiyeli taşır. İzmir uygulamasında elektrikli otobüslerin bakım maliyetlerinde %60'a varan azalma kaydedilmiştir (Güldüler, 2022). Antalya'da da elektrikli otobüslerin yaygınlaşmasıyla uzun vadede filo bakım-onarım giderlerinde düşüş beklenebilir. Özetle, enerji tasarrufu bileşeni, sadece yakıt tüketiminin azalmasıyla değil, artırılmış enerji verimliliği, fren enerjisi geri kazanımı, rölanti kayıplarının olmaması ve düşük bakım ihtiyacı ile bütüncül bir ekonomik fayda yaratmaktadır. Bu da kısıtlı belediye kaynaklarının daha verimli kullanılmasına ve toplu taşıma hizmetlerinin finansal sürdürülebilirliğine katkı sağlayacaktır.

4.3.2.3. Kentsel hava kalitesi iyileşmesi ve halk sağlığına katkıları

Elektrikli otobüslerin en somut faydalarından biri, kent merkezlerinde hava kalitesini iyileştirerek halk sağlığına olumlu etki yapmalarıdır. Dizel otobüslerin egzoz gazları, insan sağlığına zararlı birçok bileşen içerir: Partiküler madde (PM₁₀, PM_{2.5}), azot dioksit (NO₂), karbon monoksit (CO) ve uçucu organik bileşikler bunların başında gelmektedir. Bu kirleticiler solunum ve kardiyovasküler sistem üzerinde ciddi tahribat yapmakta, astım, bronşit, kalp hastalıkları ve akciğer kanseri riskini artırmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) bağlı Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC), dizel motor egzozunu insanlarda kanserojen (Grup 1) olarak sınıflandırmıştır. Bu karar, dizel kaynaklı hava kirleticilerin uzun vadede kanser dahil birçok hastalığa neden olabileceğine dair bilimsel kanıtlara dayanmaktadır. Elektrikli otobüsler ise egzoz emisyonunu tamamen ortadan kaldırarak, bu zararlı maddelerin şehir atmosferine karışmasını engellemektedir. Böylece, yoğun otobüs güzergâhlarında ve duraklarında hava kalitesi belirgin şekilde iyileşmektedir.

Türkiye genelinde hava kirliliği, halk sağlığını tehdit eden başlıca etkenlerden biri olup her yıl on binlerce erken ölüme yol açmaktadır. Temiz Hava Hakkı Platformu'nun raporuna göre 2021 yılında ülkede en az 42.000 kişi hava kirliliği nedeniyle hayatını kaybetmiştir. Bu ölümlerin önemli bir kısmı, ulaşım kaynaklı kirlilikten de etkilenmektedir. Büyük şehirlerimizde (İstanbul, Ankara, İzmir gibi) trafik kaynaklı kirleticiler yüzünden binlerce insan erken yaşta yaşamını yitirirken, Antalya'da da durum ciddiyetini korumaktadır. Antalya, coğrafi konumu itibarıyla temiz hava açısından avantajlı görünse de, özellikle yaz aylarında artan trafik hacmi ve turizm kaynaklı hareketlilik, kent merkezinde dönemsel hava kalitesi problemlerine yol açabilmektedir. Dizel otobüslerden çıkan NO₂, astım ataklarını tetikleyen ve akciğer fonksiyonlarını baskılayan bir kirleticidir; PM_{2.5} ise akciğer dokusuna derinlemesine nüfuz ederek kronik solunum yolu ve kalp hastalıklarına zemin hazırlamaktadır. Elektrikli otobüs filosuna geçilmesi, bu kirleticilerin yoğun olduğu güzergâhlarda (örneğin tarihi Kaleiçi çevresi, şehir merkezi, otogar gibi) hava kirliliğini anında düşürecektir. Bu sayede hastalık insidansında azalma, halk sağlığı harcamalarında düşüş ve yaşam kalitesinde artış beklenmektedir.

4.3.2.4. Gürültü kirliliği ve trafik kaynaklı stresin azalması

Gürültü kirliliği, büyük kent merkezlerinde sıkça göz ardı edilen ancak halk sağlığı ve yaşam kalitesi üzerinde belirgin etkileri olan bir sorundur. Özellikle yoğun trafikli arterler ve otobüs güzergâhları civarında yaşayan insanlar, sürekli motor ve egzoz gürültüsüne maruz kalarak stres, uyku bozuklukları ve hatta kardiyovasküler rahatsızlıklara yatkın hale gelmektedir. Avrupa Çevre Ajansı verilerine göre, Avrupa Birliği nüfusunun en az %20'si sağlığa zararlı düzeyde çevresel gürültüye maruz kalmaktadır ve trafik gürültüsüne uzun süre maruz kalmak uyku bozuklukları ile kalp-damar ve metabolik hastalıklara yol açabilmektedir. Antalya'da özellikle kent merkezindeki ana yollar (örneğin Atatürk Bulvarı, Işıklar Caddesi gibi) ve otobüs duraklarının çevresi, yüksek gürültü seviyeleriyle dikkat çekmektedir. Dizel otobüsler, motor gürültüsü ve titreşim kaynaklı sesleriyle bu kirliliğin önemli bir parçasını oluşturmaktadır.

Elektrikli otobüsler ise sessiz çalışma özellikleriyle gürültü kirliliğinin azaltılmasında kilit rol oynamaktadır. Elektrik motorları, içten yanmalı motorlara kıyasla çok daha az

mekanik gürültü üretir; ayrıca araç duraklama halinde iken motorları tamamen sessizdir. Ankara'daki pilot uygulamalardan elde edilen deneyimler, elektrikli otobüslerin seyir halindeyken neredeyse yalnızca lastik-yol sesini duyulur seviyede bıraktığını, dizel araçlara kıyasla gürültüyü belirgin ölçüde azalttığını göstermiştir (Akarsu, 2022). Elektrikli otobüslerin titreşimsiz ve sarsıntısız sürüş sağlaması da yolcular için konforu artırırken, çevre sakinlerinin maruz kaldığı rahatsız edici uğultu ve motor gürültüsünü minimuma indirmektedir. Bu durum, kent yaşamında sakinlik ve huzur unsurlarını öne çıkararak trafik kaynaklı stresi azaltmaktadır. Gürültü kirliliğinin azalmasıyla birlikte, şehir sakinlerinde psikolojik stres düzeylerinin ve gürültüye bağlı konsantrasyon kayıplarının azalması beklenmektedir. Özellikle okullar, hastaneler veya konut alanları yakınındaki otobüs güzergâhlarında elektrikli araçların kullanımı, bu hassas bölgelerde yaşayanların yaşam kalitesini yükseltecektir. Antalya özelinde, turistik ve tarihi bölgelerde (örneğin Kaleiçi, Konyaaltı sahil bandı) sessiz ulaşım araçlarının kullanımı, hem ziyaretçilerin deneyimini iyileştirecek hem de kültürel miras alanlarında çevresel gürültüyü azaltacaktır. Sessiz çalışan otobüsler, açık hava etkinliklerinin, kafelerin ve yaya alanlarının yoğun olduğu turistik merkezlerde şehir gürültüsünü arka plana çekerek daha hoş bir atmosfer yaratmaktadır. Bu sayede, hem yerel halk hem de turistler için daha yaşanabilir bir kentsel çevre oluşacaktır. Dolayısıyla, elektrikli otobüslere geçişin gürültü kirliliği ve stres azaltımı bileşeni, Antalya'nın hem sakinlerine hem de misafirlerine daha sağlıklı ve konforlu bir şehir ortamı sunma hedefiyle örtüşmektedir.

4.2.3.5. Sosyal eşitlik ve kentsel yaşam kalitesi artışı

Toplu taşıma sistemlerindeki dönüşümler yalnızca çevresel değil, aynı zamanda sosyal sürdürülebilirlik boyutunda da önemli etkiler yaratmaktadır. Elektrikli otobüslere geçiş, Antalya'da toplu taşımanın kalitesini yükselterek daha fazla insanın bu hizmetten yararlanmasını teşvik edebilir. Modern elektrikli otobüsler genellikle alçak tabanlı, engelli erişimine uygun ve geniş iç hacimli olarak tasarlanmaktadır. Bu da tekerlekli sandalye kullanan bireyler, yaşlılar ve çocuk arabalı yolcular için toplu taşımanın fiziksel erişilebilirliğini artırır. Yeni nesil otobüslerde dijital bilgilendirme ekranları, sesli anons sistemleri ve iklimlendirme gibi konfor unsurlarının bulunması, toplu taşıma deneyimini herkes için iyileştirmektedir. Dolayısıyla elektrikli otobüs

yatırımları, yalnızca çevreci değil aynı zamanda insan odaklı tasarımları da beraberinde getirerek sosyal kapsayıcılığı desteklemektedir.

Antalya'nın demografik yapısına bakıldığında, kentte önemli sayıda dar gelirli hane ve aracı olmayan nüfus kesimi bulunmaktadır. Toplu taşıma bu kesimler için temel ulaşım aracı olup, hizmet kalitesindeki iyileşmeler doğrudan yaşam kalitesine yansımaktadır. Elektrikli otobüslerin sessiz ve temiz olması, toplu taşıma ile seyahat etmeyi daha çekici hale getirebilir, böylece özel araç kullanımına alternatif oluşturarak farklı sosyo-ekonomik grupların aynı ulaşım imkanlarından faydalanmasını sağlayabilir. Bu bağlamda elektrikli otobüslere geçiş, şehir içi ulaşımında fırsat eşitliğini güçlendiren bir adım olacaktır. Temiz ve modern toplu taşıma, kent sakinlerinin günlük hayata katılımını artırarak sosyal bütünleşmeye katkıda bulunur. Örneğin, dizel otobüslerde egzoz dumanı veya gürültü nedeniyle rahatsız olup toplu taşımadan kaçınan bazı bireyler, elektrikli otobüslerin yarattığı konforlu ortam sayesinde toplu taşımayı tercih etmeye başlayabilir. Bu durum, trafik sıkışıklığının azalması ve yolculuk sürelerinin kısalması gibi dolaylı faydalar da getirecektir.

Elektrikli otobüslerin Antalya'nın kentsel yaşam kalitesine katkıları da çok yönlüdür. Daha temiz hava, daha az gürültü ve estetik açıdan modern araçlarla donatılmış bir toplu taşıma sistemi, şehirde genel bir yaşanabilirlik artışı sağlamaktadır. Toplu taşımanın imajının iyileşmesi, kentlilerin kendi araçlarından vazgeçip otobüs, tramvay gibi seçeneklere yönelme eğilimini güçlendirebilir. Bu da uzun vadede Antalya'da daha yaya dostu, daha az trafik baskısı olan, kamusal alanları daha sağlıklı bir kent dokusu demektir. Ayrıca, elektrikli otobüs kullanımı Antalya'nın sürdürülebilirlik konusundaki kararlılığını ortaya koyarak ulusal ve uluslararası düzeyde örnek bir uygulama profili oluşturmaktadır. Bu durum, kente dışardan gelecek yatırımlar, uluslararası işbirlikleri ve çevre bilincine sahip turistler açısından da olumlu bir izlenim yaratmaktadır. Antalya'nın "yeşil ve yenilikçi ulaşım" kimliği kazanması, hem kent halkında gurur ve sahiplenme duygusu oluşturacak hem de şehir yönetiminde ilerici politikaların önünü açacaktır.

4.3.3. Ekonometrik analiz sonuçları

Elektrikli otobüslere geçişin Antalya ili özelindeki fayda-maliyet analizinin bu bölümünde, 4.3.1 başlığında detaylandırılan maliyet bileşenleri ile 4.3.2 başlığında sunulan fayda bileşenleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmekte; kısa, orta ve uzun vadeli perspektiflerden yorumlanmakta; aynı zamanda mevcut riskler, avantajlar ve stratejik fırsatlar SWOT benzeri bir çerçevede analiz edilmektedir. Antalya'nın coğrafi, iklimsel, sosyo-ekonomik ve demografik özgülüğü dikkate alınarak yapılan bu değerlendirme, yerel yönetimlerin elektrikli otobüs dönüşüm kararlarına hem teorik hem de uygulamalı bir temel sağlamaktadır.

4.3.3.1. Maliyet ve fayda bileşenlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi

Toplam yatırım maliyeti, analizde öne çıkan en yüksek maliyet kalemidir. Antalya'da her bir elektrikli otobüsün, şarj altyapısı ve enerji destek sistemleriyle birlikte toplam yatırım bedeli dizel eşdeğerinin en az %50 üzerinde yer almaktadır. Yalnızca araç değil, şarj altyapısının kurulum maliyeti (hızlı şarj noktaları, trafo bağlantıları, elektrik dağıtımı) ve elektrikli araçlara özgü bakım altyapısının modernizasyonu da bu maliyete dâhildir. Ancak, işletme ve bakım maliyetleri, dizel otobüslere göre %60 ila %80 arasında daha düşük seyretmekte ve bu durum özellikle 3 yıldan sonra toplam sahip olma maliyetini elektrikli otobüsler lehine çevirmektedir. Bu bağlamda, elektrikli otobüslerin kısa vadede finansal bir yük oluşturduğu, ancak orta ve uzun vadede maliyetlerin faydalar karşısında dengeye geldiği görülmektedir.

Emisyon azaltımı ve enerji verimliliği açısından fayda bileşenleri oldukça güçlüdür. Antalya'da dizel bir otobüsün yılda ortalama 47 ton CO₂ saldıdığı ve elektrikli muadillerinin bu değeri sıfıra indirdiği varsayıldığında, 100 elektrikli otobüslük bir filo ile yıllık yaklaşık 4.700 ton CO₂ emisyonunun önlenebileceği öngörülmektedir (Antalya Büyükşehir Belediyesi, 2022b). Buna ek olarak NO_x ve PM_{2.5} gibi yerel hava kirleticilerin ortadan kalkması, hava kalitesini ve halk sağlığını doğrudan olumlu etkilemektedir (WHO, 2022). Ayrıca, Antalya'nın yüksek güneşlenme süresi, enerji üretiminde yenilenebilir kaynaklardan faydalanma potansiyelini artırarak sürdürülebilir enerji döngüsü oluşturma fırsatı sunmaktadır.

Elektrikli otobüslerin sosyal faydaları da göz ardı edilemeyecek düzeydedir. Engelli erişimine uygun, sessiz ve konforlu taşıma deneyimi sunmaları, kentte toplu taşımaya olan güveni ve tercih edilme oranını artırmakta; bu da dolaylı olarak özel araç kullanımını azaltarak trafik ve çevre baskısını düşürmektedir. Ayrıca, özellikle turizm sezonunda oluşan yüksek yolcu talebini daha sürdürülebilir yöntemlerle karşılamak, kentin çevresel imajını güçlendirerek turistik rekabet avantajı sağlamaktadır.

4.3.3.2. Zaman perspektifinden değerlendirme

Kısa vadede (0–3 yıl):

- Yatırım maliyetleri bütçe açısından ciddi bir yük oluşturur.
- Şarj altyapısının ve teknik servis merkezlerinin kurulması gereklidir.
- Sürücü ve bakım personeli eğitimi için zaman ve kaynak tahsisi gerekir.
- Toplumda farkındalık ve kabul düzeyi düşüktür.
- Ancak sınırlı sayıda elektrikli otobüsle başlatılan pilot uygulamalar, halkta olumlu izlenim oluşturabilir ve dönüşümün sosyal kabulünü hızlandırabilir (Akarsu, 2022).

Orta vadede (3–7 yıl):

- Araçların işletme maliyet avantajı net şekilde hissedilmeye başlanır.
- Batarya verimliliği yüksek kalır, yedek parça erişimi standartlaşır.
- Emisyon azaltımı ve hava kalitesi iyileşmeleri belirginleşir.
- Elektrikli araçların sayısı arttıkça otobüs işletim planları daha optimize hale gelir.
- Halk sağlığı üzerindeki olumlu etkiler (astım, KOAH gibi rahatsızlıklarda azalma) gözlemlenebilir hale gelir (Temiz Hava Hakkı Platformu, 2023).

Uzun vadede (7 yıl ve sonrası):

- Toplam sahip olma maliyeti, dizel otobüslerin altına düşer (Li ve Shirvan, 2020).
- Batarya ömrü dolmaya başlar; batarya yenileme maliyetleri gündeme gelir.
- Geniş çaplı filo dönüşümünün çevresel ve sosyal faydaları maksimize olur.
- Toplu taşıma tercihinde artış gözlemlenir, özel araç bağımlılığı azalır.
- Kentsel yaşam kalitesinde artış, ulusal ve uluslararası yatırımcılar nezdinde olumlu bir şehir imajı oluşur.

Çizelge 4.3. SWOT Analizi

Kategori	Unsurlar
Güçlü Yönler	-Sıfır egzoz emisyonu ile hava kalitesine katkı
	-Düşük işletme ve bakım maliyeti
	- Sessiz, titreşimsiz sürüş deneyimi
	- Yerli elektrikli otobüs üreticilerinin varlığı
Zayıf Yönler	- Yüksek ilk yatırım maliyeti
	- Sınırlı batarya ömrü ve batarya maliyetleri
	- Şarj altyapısı eksikliği
	- Bakım personeline yeterli uzmanlaşma eksikliği
Fırsatlar	- Antalya'nın yüksek güneşlenme süresi ile yenilenebilir entegrasyon potansiyeli
	- AB fonları ve yeşil finansman destekleri
	- Artan çevre bilinci ve halk desteği
	- Turizm sektöründe çevreci ulaşım imajının katkısı
Tehditler	- Batarya tedarik zincirindeki küresel krizler
	- Enerji fiyatlarındaki dalgalanmalar
	- Mevsimsel talep artışına bağlı işletme stresleri
	- Yetersiz kamu politikası veya teşvik

Bu çerçevede Antalya, güçlü yönlerini ve fırsatlarını en verimli biçimde değerlendirmek için teknolojiye erken adapte olma ve sürdürülebilir ulaşımı yerel planlara entegre etme kapasitesine sahiptir. Zayıf yönlerin telafisi için merkezi yönetim ile eşgüdüm içinde altyapı yatırımları, eğitim programları ve yerli üreticilerle ortak geliştirme çalışmaları yürütülebilir (Çizelge 4.3).

4.4. Uygulama Stratejileri ve Politikalar

Antalya kenti, yaklaşık 2,5-2,6 milyonluk nüfusu ile Türkiye'nin beşinci büyük metropolü olup ülkenin turizm başkenti konumundadır. Hem hızla artan yerleşik nüfus ve kentsel büyüme dinamikleri, hem de yıllık 15 milyonun üzerinde yabancı turist akını, Antalya'nın ulaşım sistemi üzerinde yoğun bir talep yaratmaktadır. Antalya Büyükşehir Belediyesi'nin sera gazı envanterine göre kentte karbon emisyonlarının %30'dan fazlası ulaşım kaynaklıdır. Ulaşımın fosil yakıtlara dayalı olması, artan trafik sıkışıklığı ile birleşince hem iklim değişikliğiyle mücadeleyi zorlaştırmakta hem de turizm kenti için kritik olan hava kalitesini tehdit etmektedir. Bu nedenle Antalya, 2030 yılına kadar toplam karbon salımını %40 azaltma hedefi doğrultusunda ulaşım da düşük karbonlu teknolojilere geçiş stratejik bir öncelik vermektedir. Nitekim kent,

2013 yılında Avrupa Birliği Başkanlar Sözleşmesi'ni (Covenant of Mayors) imzalayarak ilk Sürdürülebilir Enerji Eylem Planı'nı hazırlayan belediyelerden biri olmuştur. Bu plan doğrultusunda enerji, ulaşım ve diğer sektörlerde sera gazı azaltım senaryoları geliştirilmiş; örneğin toplu taşıma filolarının kademeli olarak elektrikli araçlarla yenilenmesi yüksek öncelikli eylemler arasında tanımlanmıştır.

Antalya'nın turizm odaklı yapısı ve çevre duyarlılığı, ulaşımında temiz teknolojilere yönelmeyi hem küresel iklim taahhütleri hem de yerel yaşam kalitesi açısından zorunlu kılmaktadır. Nitekim Antalya'da daha önce dizel otobüsleri ikame etmek üzere LPG yakıtlı otobüsler filoya dahil edilmiş, böylece özellikle yaz aylarında trafik yoğunluğunun olduğu turistik bölgelerde hava kirliliğinin azaltılması hedeflenmiştir. Düşük emisyonlu LPG'li otobüslerin yaygınlaştırılması, fosil yakıtlara kıyasla yerel hava kalitesine olumlu katkılar sunmuş ve enerji güvenliği açısından da avantaj sağlamıştır. Ancak LPG gibi alternatif yakıtlar karbon emisyonlarını tamamen ortadan kaldırmamakta; daha ziyade elektrikli otobüs altyapısının henüz her yerde uygulanmadığı geçiş dönemi için kısa vadeli bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Son yıllarda Antalya, nihai hedef olarak tam elektrikli toplu taşıma sistemine geçiş yönünde pilot adımlar atmaya başlamıştır. Örneğin AB'nin Ufuk 2020 "MAchUP" projesi kapsamında belediye filosuna 2 adet elektrikli otobüs ile 25 elektrikli motosiklet ve 30 e-scooter eklenmiştir (Hamurcu, 2023). Yine Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası destekli Yeşil Ekonomi Finansman Fonu aracılığıyla 8,5 metrelik 2 elektrikli otobüs ve şarj ekipmanı kiralanarak Akdeniz Üniversitesi kampüsünde öğrenci taşımacılığında hizmete alınmıştır. Bu örnekler, Antalya'nın düşük karbonlu ulaşım vizyonuna yönelik kararlılığını göstermekle birlikte, kentin geniş ölçekli toplu taşıma sisteminde dönüşüm için daha kapsamlı stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır (Fural, 2019).

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırma, Antalya ili toplu taşıma sisteminde düşük karbonlu teknolojilere geçişin çok boyutlu etkilerini sistematik bir yaklaşımla incelemiş ve sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedefleri doğrultusunda önemli bulgulara ulaşmıştır. Çalışmanın sonuç bölümü, elde edilen ampirik verilerin kapsamlı değerlendirmesini yaparak, araştırma hipotezlerinin test edilmesi, bulgular arasındaki ilişkilerin yorumlanması ve gelecekteki politika süreçlerine yön verebilecek stratejik önerilerin geliştirilmesi süreçlerini içermektedir. Fayda-maliyet analizi metodolojisiyle elde edilen ekonometrik sonuçlar, çevresel etki değerlendirmeleri ve sosyal kabul edilebilirlik analizleri, Antalya özelinde düşük karbonlu toplu taşıma dönüşümünün uygulanabilirliğine dair bütüncül bir perspektif sunmaktadır. Bu sonuçlar, hem yerel yönetimlerin karar alma süreçlerine bilimsel bir dayanak sağlamakta hem de benzer coğrafi ve demografik özelliklere sahip diğer kentler için referans teşkil edebilecek genellenebilir bulgular ortaya koymaktadır. Araştırmanın ulaştığı sonuçlar ve geliştirilen öneriler, sürdürülebilir kentsel hareketlilik alanındaki teorik bilgi birikimine katkı sağlarken, aynı zamanda uygulamalı politika geliştirme süreçlerinde de rehber niteliği taşımaktadır.

5.1. Araştırma Bulguları ve Sonuçlar

Bu çalışma, sürdürülebilir kentsel hareketlilik bağlamında düşük karbon salınımlı toplu taşıma sistemlerinin Antalya ili örneği üzerinden fayda-maliyet analizi yöntemiyle değerlendirilmesini amaçlamıştır. Araştırma sonucunda ulaşılan bulgular, dizel, LPG ve elektrikli otobüslerin ekonomik, çevresel ve toplumsal etkilerini çok boyutlu bir yaklaşımla ortaya koymakta; elektrikli otobüslere geçişin sürdürülebilirlik ilkeleri açısından ne derece anlamlı olduğunu somut verilerle desteklemektedir.

Yapılan karşılaştırmalı analizlerde, elektrikli otobüslerin ilk yatırım maliyetlerinin, dizel ve LPG'li otobüslere kıyasla yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak uzun vadede bu araçların işletme ve bakım maliyetlerinin oldukça düşük seviyelerde seyretmesi, toplam sahip olma maliyeti açısından elektrikli otobüsleri avantajlı kılmaktadır. Özellikle birim başına düşen maliyet/fayda oranı değerlendirildiğinde, elektrikli otobüslerin ekonomik sürdürülebilirliği sağlamada öne çıktığı görülmektedir. Yapılan

hesaplamalar sonucunda dizel otobüslerde yıllık işletme maliyeti yaklaşık 450.000 TL seviyesindeyken, bu rakam LPG'li otobüslerde 370.000 TL ve elektrikli otobüslerde ise 280.000 TL civarındadır. Emisyon azaltımına sağladığı katkı ve enerji verimliliği düşünüldüğünde, birim başına sağlanan faydanın, elektrikli otobüslerde dizel araçlara göre yaklaşık %60 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Çevresel etkiler açısından bakıldığında, elektrikli otobüslerin karbon emisyonlarını sifıra yakın düzeye indirme potansiyeli taşıdığı, bu nedenle iklim değişikliğiyle mücadelede stratejik bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Dizel otobüslerin yıllık CO₂ salımı 160 ton civarındayken, LPG'li otobüslerde bu miktar 120 ton seviyesinde kalmakta, ancak elektrikli otobüslerde bu değer, enerji üretiminde kullanılan kaynağa bağlı olarak 20–30 ton seviyelerine kadar düşebilmektedir. Yenilenebilir enerji ile entegre şarj altyapılarının kullanılması durumunda bu emisyonların sıfırlanması dahi mümkündür. Ayrıca hava kalitesinde sağladığı iyileşme, partikül madde salınımının azalması ve gürültü kirliliğinin ortadan kalkması gibi etkiler, kentsel çevre sağlığı açısından önemli kazanımlar sunmaktadır.

Toplumsal etkiler bakımından, elektrikli otobüslerin sunduğu konforlu, sessiz ve titreşimsiz ulaşım deneyimi; kent sakinlerinin ulaşım memnuniyetini artırmaktadır. Özellikle yoğun turizm sezonlarında yüksek yolcu hacmine maruz kalan Antalya gibi şehirlerde, sessiz çalışan araçların gürültü kirliliğini azaltması hem turistlerin hem de yerel halkın yaşam kalitesine olumlu katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, düşük emisyonlu araçların kullanımı ile kentte solunum yolu hastalıklarının görülme oranında orta ve uzun vadede düşüş yaşanması, halk sağlığına yönelik bir başka olumlu çıktıyı teşkil etmektedir. Ayrıca engelli bireylerin erişimine uygun tasarlanan elektrikli otobüsler, toplumsal kapsayıcılığı artırmakta ve sosyal sürdürülebilirlik açısından değerli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Dizel, LPG ve elektrikli otobüs sistemlerinin çok boyutlu karşılaştırmasını içeren tablo, kentsel ulaşımında alternatif teknolojilerin sürdürülebilirlik ölçütleri bağlamında ne derece farklılaştığını açıkça ortaya koymaktadır. Her bir taşıma sisteminin; yatırım ve işletme maliyetleri, karbon emisyon düzeyleri, enerji verimliliği, çevresel ve toplumsal etkileri yönünden incelenmesi, bütüncül bir değerlendirme yapmaya olanak sağlamaktadır. Bu çok yönlü değerlendirme, aynı zamanda yerel yönetimlerin hangi

ulaşım alternatifini tercih etmesi gerektiği hususunda bilimsel bir karar destek mekanizması olarak işlev görebilir.

Tablonun ilk satırında yer alan yatırım maliyeti, elektrikli otobüslerin ilk temin ve altyapı kurulum maliyetlerinin yüksekliğini göstermektedir. Bu durum, özellikle btce kısıtları olan yerel yönetimler için ilk etapta önemli bir bariyer oluşturabilmektedir. Buna karşın dizel otobüsler düşük yatırım maliyetleri ile daha cazip görünse de, bu maliyet avantajı kısa vadeli bir yanılsamadır; çünkü izleyen satırda yer alan işletme maliyetleri incelendiğinde, elektrikli otobüslerin yıllık giderlerinin dizel ve LPG’li muadillerine göre ciddi şekilde düşük olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, ilk yatırımın yüksekliği, zaman içinde işletme maliyetlerinden sağlanan tasarrufla telafi edilmekte; hatta toplam maliyet açısından avantajlı hale gelmektedir. Bu noktada, maliyetleri yalnızca parasal yönüyle değil, aynı zamanda birim başına fayda üretimi temelinde değerlendirmek gerekir ki bu da fayda-maliyet analizinin özünü oluşturmaktadır.

Bir sonraki boyut olan karbon emisyonu, ulaşım sistemlerinin çevresel etkilerini somutlaştıran en önemli göstergelerden biridir. Elektrikli otobüslerin, enerji kaynağının yenilenebilir olması durumunda neredeyse sıfır emisyonla çalışabilmesi, onları çevresel açıdan en sürdürülebilir seçenek haline getirmektedir. Buna karşılık, dizel ve LPG’li otobüsler sırasıyla 160 ton ve 120 ton yıllık karbon salımı ile şehirlerin karbon ayak izine ciddi katkıda bulunmaktadır. Karbon emisyonlarının sadece evre üzerindeki doğrudan etkileri değil; aynı zamanda sağlık ve yaşam kalitesi üzerinde dolaylı etkileri göz önünde bulundurulduğunda, bu farkın önemi daha da belirginleşmektedir.

Enerji verimliliği, sistemlerin teknik performansının çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğe katkısını belirleyen kritik bir ölçüttür. Elektrikli motorların enerji dönüşüm oranı, %85–90 seviyelerinde seyrederken; dizel motorlar %30–40 oranında kalmakta, bu da fosil yakıtların büyük bir kısmının boşa harcandığını göstermektedir. Dolayısıyla, elektrikli araçlar aynı enerji girdisiyle daha fazla hareket üretmekte, bu da hem yakıt maliyetlerini azaltmakta hem de enerji kaynaklarının daha etkin kullanımını sağlamaktadır. Özellikle enerji arz güvenliği açısından dışa bağımlı ülkelerde bu durum stratejik bir öneme sahiptir.

Gürültü kirliliği açısından yapılan karşılaştırmada, elektrikli otobüslerin sessiz çalışması, şehir yaşamı üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Gürültü, görünmeyen ancak psikolojik ve fizyolojik etkileri bakımından ciddi bir kentsel sorundur. Dizel motorların çıkardığı yüksek ses düzeyi, özellikle yoğun nüfuslu bölgelerde yaşam konforunu düşürmekte ve stres kaynaklı sağlık sorunlarını artırmaktadır. Elektrikli otobüslerin bu anlamda sunduğu avantaj, sadece bireylerin günlük yaşam kalitesini değil; aynı zamanda şehirlerin turizm potansiyelini de olumlu yönde etkilemektedir. Sağlık etkileri, toplu taşıma sistemlerinin dolaylı ama etkili bir çıktısıdır. Dizel araçların neden olduğu hava kirliliği; solunum yolu hastalıkları, alerjik reaksiyonlar ve kardiyovasküler sorunlarla doğrudan ilişkilidir. Elektrikli otobüslerin egzoz gazı salmaması, halk sağlığına doğrudan katkı sağlamaktadır. Bu katkı, özellikle hassas gruplar olan çocuklar, yaşlılar ve kronik hastalığı olan bireyler için kritik önemdedir. Ayrıca, temiz ulaşım sistemlerinin yaygınlaşması, uzun vadede sağlık harcamalarında tasarruf sağlayarak kamusal maliyetlerin azaltılmasına da yardımcı olmaktadır.

Son olarak, toplumsal kabul, teknolojik dönüşümlerin uygulanabilirliğini doğrudan etkileyen sosyal bir parametredir. Elektrikli otobüslerin çevre dostu kimliği, düşük gürültü seviyesi ve konforlu sürüş özellikleri nedeniyle kent sakinleri tarafından daha yüksek oranda benimsenmekte ve desteklenmektedir. Buna karşılık, LPG ve dizel otobüsler halen kullanılmakta olsa da, özellikle çevresel duyarlılığı yüksek bireylerde tepki ile karşılanmaktadır. Toplumsal kabulün yüksek olması, ulaşım politikalarının kamuoyu tarafından desteklenmesini ve kullanıcı alışkanlıklarının dönüşümünü kolaylaştırmaktadır. Bu da, sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin sadece teknik değil, aynı zamanda sosyopolitik bir boyutunun da olduğunu göstermektedir.

Araştırma kapsamında belirlenen beş temel hipotez, hem kuramsal temellere hem de saha verileri üzerinden elde edilen bulgulara dayanılarak kapsamlı biçimde test edilmiş ve değerlendirilmiştir. Bu hipotezler, sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında düşük karbonlu toplu taşıma sistemlerine geçişin çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutlarını ölçmeye yönelik olarak kurgulanmıştır. Elde edilen analiz bulguları, hipotezlerin çoğunlukla doğrulandığını göstermiş ve araştırma problemini destekleyici nitelikte sonuçlar ortaya koymuştur. İlk hipotez, dizel ve LPG'li otobüslerin elektrikli araçlarla değiştirilmesinin karbon salınımını önemli ölçüde azaltacağı yönündedir. Yapılan karbon emisyonu analizleri bu hipotezi güçlü biçimde desteklemiş; elektrikli

otobüslerin enerji üretim biçimine bağlı olarak yıllık bazda %80'e varan emisyon azaltımı sağladığı belirlenmiştir. Dizel otobüslerin yıllık yaklaşık 160 ton CO₂ salımı gerçekleştirmesine karşın, elektrikli otobüslerin bu değeri 20–30 ton aralığına kadar düşürmesi, sera gazı etkisi, hava kalitesi ve kentsel çevre sağlığı bakımından dönüşümün çevresel önemini somutlaştırmaktadır. Bu sonuç, elektrikli toplu taşıma teknolojilerinin iklim değişikliğiyle mücadelede stratejik bir araç olduğunu ortaya koymakta ve bu hipotezin doğruluğunu açıkça teyit etmektedir.

İkinci hipotez, elektrikli otobüslerin uzun vadeli işletme maliyetlerinin fosil yakıtlı araçlara kıyasla daha düşük olacağı ve bu sayede ekonomik sürdürülebilirliğe katkı sağlayacağı yönündedir. Araştırma verileri, bu hipotezin de yüksek doğrulukla teyit edildiğini göstermektedir. Elektrikli araçların bakım ve işletme maliyetleri, içten yanmalı motorlu taşıtlara kıyasla kayda değer ölçüde daha düşüktür. Yıllık işletme maliyetleri incelendiğinde, elektrikli otobüslerin 280.000 TL seviyelerinde kalması; buna karşılık dizel ve LPG'li araçların sırasıyla 450.000 TL ve 370.000 TL gibi daha yüksek giderler doğurması, uzun vadeli ekonomik avantajı açıkça ortaya koymaktadır. Beş yıllık toplam sahip olma maliyeti hesaplamalarında da benzer şekilde elektrikli araçların, ilk yatırım maliyetine rağmen ekonomik olarak daha rasyonel bir seçenek olduğu görülmüştür. Bu veriler, kamu bütçesinin verimli kullanımı, maliyet etkinliği ve uzun vadeli yatırım stratejileri açısından elektrikli otobüslerin avantajlı bir alternatif olduğunu göstermekte ve ilgili hipotezi doğrulamaktadır.

Üçüncü hipotez, elektrikli toplu taşıma araçlarının kullanımının halkın ulaşım deneyimini iyileştireceği ve hava kalitesinde artışa neden olacağı varsayımına dayanmaktadır. Gerek Antalya ili özelinde yapılan saha gözlemleri gerekse literatürdeki başarılı örnekler bu hipotezin doğruluğunu desteklemektedir. Elektrikli otobüslerin sessiz çalışması, titreşimsiz yapısı ve iç mekândaki konfor düzeyinin yüksekliği; yolcu memnuniyetini artırmakta ve özellikle sabah ve akşam saatlerinde yaşanan trafik stresini azaltmaktadır. Bununla birlikte, emisyonuz çalışmaları nedeniyle partikül madde ve zararlı gaz salınımını önemli ölçüde azaltarak kent içi hava kalitesini iyileştirmekte, bu da özellikle çocuklar, yaşlılar ve solunum yolu hastalıkları bulunan bireyler açısından önemli bir sağlık kazanımı sunmaktadır. Çin'in Shenzhen şehri, Danimarka'nın Kopenhag kenti gibi dünya genelindeki başarılı uygulamalar, elektrikli toplu taşımanın kullanıcı deneyimi üzerindeki olumlu etkilerini

göstermektedir. Dolayısıyla bu hipotezin de araştırma sonuçlarıyla desteklendiği ifade edilebilir.

Dördüncü hipotez, elektrikli araçların entegrasyonu için gerekli altyapı yatırımlarının Antalya Büyükşehir Belediyesi'nin mevcut bütçesiyle karşılanabilir düzeyde olduğunu öngörmektedir. Bu hipotez diğerlerine kıyasla daha karmaşık bir değerlendirmeyi gerektirmiş ve bulgular, bu varsayımın yalnızca kısmen doğrulandığını ortaya koymuştur. Mevcut belediye bütçesi göz önünde bulundurulduğunda, elektrikli otobüs dönüşümünün tüm araç filosu için tek aşamada gerçekleştirilmesi ekonomik olarak mümkün görünmemektedir. Ancak, dönüşümün etaplar hâlinde yapılması, dış kaynaklı finansman modelleri (örneğin Avrupa Birliği destek fonları, karbon kredileri veya yeşil tahviller) ile desteklenmesi durumunda bu süreç mali açıdan yönetilebilir hâle gelmektedir. Dolayısıyla, hipotez tamamen reddedilmese de, dönüşüm sürecinin başarısı ciddi ölçüde ek finansal destek mekanizmalarına bağlıdır. Bu sonuç, kamu finans yönetimi açısından planlamanın uzun vadeli, etaplı ve sürdürülebilir olmasını zorunlu kılmaktadır.

Beşinci ve son hipotez, elektrikli otobüslerin enerji verimliliğinin fosil yakıtlı araçlara göre daha yüksek olduğu yönündedir. Teknik veriler ve mühendislik temelli ölçümler bu hipotezin mutlak doğruluğunu ortaya koymuştur. Elektrikli motorların enerji dönüşüm verimliliği %85–90 aralığındayken, dizel motorlarda bu oran %30–40 seviyelerinde kalmaktadır. Bu durum, elektrikli otobüslerin aynı miktardaki enerji ile daha fazla kilometre kat edebildiğini, daha az enerji tüketerek aynı düzeyde ulaşım hizmeti sunabildiğini ve bu sayede hem enerji maliyetlerinde hem de karbon ayak izinde tasarruf sağladığını göstermektedir. Ayrıca, enerji verimliliği yüksek sistemlerin enerji arz güvenliği, dışa bağımlılık ve kaynak kullanımı açısından stratejik önem taşıdığı göz önünde bulundurulduğunda, bu hipotezin yalnızca teknik değil, makroekonomik düzeyde de doğrulandığı ifade edilebilir.

5.2. Uygulama Stratejileri ve Politika Önerileri

Elektrikli otobüs dönüşümünün Antalya'da başarılı bir şekilde hayata geçirilebilmesi için kısa, orta ve uzun vadede atılması gereken adımlar ile kurumsal, yasal, finansal ve teknik stratejiler bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Araştırma kapsamında elde

edilen bulgular doğrultusunda, Antalya Büyükşehir Belediyesi'nin MAtchUP projesi kapsamında uygulamaya koyduğu 330 kW kurulu güce sahip güneş enerjisi santrali ve 400 kWh kapasiteli batarya depolama sistemi, elektrikli araçların temiz enerjiyle şarj edilmesine yönelik stratejik bir adım olarak değerlendirilmektedir. Bu sistem, Antalya'nın ortalama güneşlenme süresi göz önüne alındığında, günlük yaklaşık 1650 kWh düzeyinde enerji üretme kapasitesine sahiptir. Batarya depolama kapasitesi ile birlikte düşünüldüğünde, günlük toplamda 2050 kWh'lik bir enerji rezervine ulaşılmaktadır. Elektrikli bir otobüsün günlük ortalama enerji tüketimi yaklaşık 250 kWh olarak hesaplandığında, bu sistemle günlük olarak yaklaşık sekiz otobüsün tam şarjı mümkün hale gelmektedir. Dolayısıyla, Antalya genelinde yer alan yaklaşık 400 otobüsün tamamının elektrikli sisteme dönüştürülerek temiz enerjiyle işletilmesi hedeflendiğinde, bu ihtiyacı karşılamak üzere benzer kapasiteye sahip yaklaşık 49 adet güneş enerjisi santraline gereksinim duyulmaktadır. Bu bağlamda, yerel yönetimlerin elektrikli otobüs dönüşüm sürecini sadece ulaşım politikaları bağlamında değil, aynı zamanda yenilenebilir enerji yatırımları ile entegre bir şekilde planlaması önem arz etmektedir. Şarj altyapısının kent içi ulaşımın gereksinimlerine göre yaygınlaştırılması, enerji arz güvenliğinin sağlanması ve karbon nötr ulaşım vizyonunun hayata geçirilmesi açısından stratejik bir zorunluluk olarak değerlendirilmektedir. Antalya gibi yüksek güneş potansiyeline sahip kentler için bu tür projeler, sürdürülebilir enerji-ulaşım entegrasyonunun uygulanabilirliğini somutlaştırmakta ve diğer şehirler için de örnek bir model sunmaktadır. Aşağıda, çalışmanın bulguları ışığında geliştirilen somut öneriler yer almaktadır:

Kısa Vadeli Adımlar (0-2 yıl)

Dönüşümü yönlendirecek bir *elektrikli ulaşım çalışma grubu* oluşturulmalıdır. Bu yapı, Büyükşehir Belediyesi'nin Ulaşım, Çevre, Maliye gibi ilgili birimlerini, Antalya Ulaşım A.Ş. gibi işletmecileri, elektrik dağıtım şirketini ve gerekirse üniversite temsilcilerini kapsamalıdır. Paydaşlar arası bu koordinasyon birimi, dönüşüm sürecinin yol haritasını netleştirerek sorumluları tanımlamalı ve düzenli toplantılarla ilerlemeyi takip etmelidir. Kurumsal olarak, belediye bünyesinde enerji verimliliği ve temiz ulaşım odaklı bir alt birim veya koordinatör atanması da önerilir (Antalya Büyükşehir Belediyesi, 2022b).

Dönüşüm öncesi öğrenme ve toplumsal kabulü artırma amacıyla pilot ölçekli elektrikli otobüs projeleri devreye alınmalıdır. Antalya’da halihazırda üniversite kampüsü içinde hizmet veren iki elektrikli otobüsün deneyimlerinden yararlanarak, yoğun bir şehir hattında (örneğin turistik merkez–havaalanı veya kent merkezi–otogar arasında) birkaç elektrikli otobüsle pilot hat işletmesi gerçekleştirilebilir. Bu pilot çalışma, gerçek işletme koşullarında menzil, şarj süresi, yolcu memnuniyeti gibi konularda veri sağlayacak ve olası teknik sorunları büyük filoya geçmeden önce tespit etme imkânı verecektir. Elde edilecek veriler, kapsamlı dönüşüm planının revize edilmesinde kullanılmalıdır.

Kısa vadede, elektrikli otobüslerin operasyonuna uygun şarj altyapısının planlanmasına ve kuruluma başlanması kritik önemdedir. Mevcut otobüs depoları ve garajları gözden geçirilerek, buralarda yüksek güçlü şarj istasyonları için yer ve elektrik bağlantı gereksinimleri belirlenmelidir. Öncelikle filonun küçük bir kısmını destekleyecek sayıda (örneğin 5-10 adet) şarj ünitesinin kurulumu, elektrik altyapısının test edilmesini ve ilk operasyonların kesintisiz yürütülmesini sağlayacaktır. Bu aşamada elektrik dağıtım şirketi ile koordinasyon içinde çalışılarak şebekenin yük kapasitesi analiz edilmeli ve gerekli görülen trafoların güçlendirilmesine hemen başlanmalıdır. Akıllı şarj yönetim sistemleri de entegre edilerek, enerji talebinin şebeke üzerinde olumsuz etkisi en aza indirilmeli (örneğin, gece tarifelerinde şarj planlama gibi yöntemlerle).

Kısa vadede başarının ön koşullarından biri, dönüşüm için gerekli finansmanın güvence altına alınmasıdır. Bu bağlamda Antalya Büyükşehir Belediyesi, ulusal ve uluslararası fon kaynaklarına başvurmalıdır. Örneğin, Avrupa Birliği’nin iklim dostu ulaşım hibeleri, Dünya Bankası veya Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası (EBRD) gibi kuruluşların sürdürülebilir ulaşım kredileri değerlendirilebilir. TurSEFF gibi enerji verimliliği finansman programları Antalya’da daha önce pilot otobüs alımını desteklemiştir; benzer şekilde yeni hibe ve krediler araştırılmalıdır. Ayrıca, belediye bütçesinde kademeli dönüşüm için pay ayrılması ve gerekirse kamu-özel iş birliği (PPP) modellerinin kullanılması (örneğin, özel sektörün şarj altyapısına yatırım yapması karşılığında uzun vadeli işletim hakları gibi) düşünülebilir. Kısa vadede finansman planı netleştirilerek ilk elektrikli otobüs alımları ve altyapı yatırımları için gerekli kaynaklar hazır hale getirilmelidir.

Dönüşüm sürecinin başlangıcında, insan kaynağı hazırlığı üzerinde durulmalıdır. Elektrikli otobüslerin operasyonu, bakımı ve acil durum prosedürleri konusunda kapsamlı eğitim programları tasarlanıp uygulanmalıdır. Antalya Ulaşım A.Ş. bünyesindeki şoförler ve bakım personeli, üretici firmaların da desteğiyle yeni teknolojilere ilişkin uygulamalı eğitimler almalıdır. Bu sayede, filoya eklenecek elektrikli otobüsler hakkında teknik ekibin yeterliliği artırılacak ve olası hatalar veya yanlış kullanım kaynaklı sorunlar en baştan önlenecektir. Ayrıca, itfaiye ve ilk müdahale ekipleri de elektrikli araçlarla ilgili temel eğitimlere tabi tutularak olası kaza veya acil durumlara hazırlıklı hale getirilmelidir.

Kısa vadede, projenin başarılı olması için halkın desteği ve farkındalığı büyük önem taşır. Bu nedenle, elektrikli otobüs dönüşümünün amaçlarını ve faydalarını Antalya kamuoyuna anlatan bir iletişim stratejisi devreye sokulmalıdır. Yerel basın, sosyal medya ve belediye duyuruları aracılığıyla, elektrikli otobüslerin çevresel ve ekonomik avantajları (temiz hava, sessiz ulaşım, düşük işletme maliyeti vb.) vurgulanmalıdır. Özellikle Antalya'nın bir turizm kenti olduğu dikkate alınarak, "Temiz Ulaşım, Temiz Antalya" gibi sloganlarla hem yerel halk hem turistler nezdinde farkındalık kampanyaları yürütülebilir. Halktan gelecek geri bildirimler için bir mekanizma (örneğin belediyenin mobil uygulaması üzerinden anketler) kurulması da, vatandaşların sürece katılımını ve sahiplenmesini artıracaktır.

Orta Vadeli Adımlar (3-5 yıl)

Orta vadede, pilot uygulamalardan elde edilen deneyimler ışığında elektrikli otobüs filosu kademeli olarak büyütülmelidir. Antalya Büyükşehir Belediyesi, her yıl belirli sayıda dizel otobüsü emekliye ayırıp yerine elektrikli otobüsler ikame ederek 5 yıl içinde filonun önemli bir bölümünü elektrikliye çevirmeyi hedeflemelidir. Bu geçiş sürecinde, özellikle yüksek yolcu talebine sahip ve menzil açısından uygun hatlar önceliklendirilmelidir. Örneğin, şehir merkezindeki sabit hatlar veya turistik bölgelere giden orta mesafeli rotalar elektrikli otobüslerle hizmet verecek şekilde dönüştürülebilir. Filonun genişlemesiyle birlikte, şarj altyapısı da şehir geneline yaygınlaştırılmalıdır. Bu dönemde, sadece otobüs garajlarında değil, stratejik noktalarda (son duraklar, transfer merkezleri, otogar vb.) hızlı şarj istasyonları

kurulması gündeme alınmalıdır. Böylece otobüsler gün içinde de ihtiyaç halinde şarj olabilecek ve operasyon esnekliği artacaktır.

Orta vadeli hedeflerden biri, elektrikli otobüslerin kullandığı elektriğin mümkün olduğunca yenilenebilir kaynaklardan sağlanması olmalıdır. Antalya, güneşlenme süresi yüksek bir Akdeniz kentidir; bu avantaj değerlendirilerek otobüs depolarının çatılarına güneş panelleri kurulabilir ve güneş enerjisinden elektrik üretimi gerçekleştirilebilir. İzmir örneğinde ESHOT atölye binalarına kurulan 1 MW'lık güneş santrali sayesinde yılda ~420 ton CO₂ emisyonu engellenmiştir. Antalya'da benzer bir yaklaşım hem emisyonları daha da azaltacak hem de uzun vadede enerji maliyetlerini düşürecektir. Orta vadede belediye, kendi yenilenebilir enerji kaynaklarını geliştiremeye bile, elektrik tedarikini yeşil enerji sertifikaları ile belgelendirerek filoyu dolaylı da olsa yenilenebilir kaynaklarla besleyebilir.

Dönüşüm sürecinin sürekliliği için uygun politika ve düzenlemelerin hayata geçirilmesi gerekir. Orta vadede Antalya Büyükşehir Belediyesi, örneğin yeni alınacak toplu taşıma araçları için düşük emisyon şartı getirebilir ve filoya eklenecek her yeni otobüsün elektrikli veya en azından hibrit olmasını zorunlu tutabilir. Mevcut özel halk otobüsleri ve minibüslerin de zamanla elektrikli modellere geçişini teşvik etmek üzere şehiriçi ulaşım yönetmeliklerinde düzenlemeler yapılabilir (örneğin, elektrikli araç kullanan özel taşımacılara ruhsat kolaylığı veya maddi teşvikler sağlanması gibi). Ayrıca, şehir merkezinde veya hassas turistik bölgelerde düşük emisyonlu ulaşım bölgeleri ilan edilip bu bölgelere sadece elektrikli/toplu taşıma araçlarının girişine izin vermek, dönüşümü hızlandırıcı bir politika aracı olabilir. Bu tür düzenleyici adımlar, dönüşüm hedefine kurumsal bir zorunluluk ve yönlendirme kazandıracaktır.

Orta vadede finansman stratejileri çeşitlendirilerek projeye devamlı kaynak akışı sağlanmalıdır. İlk yıllardaki deneyimler ışığında, yenilikçi finansman modelleri uygulamaya konabilir. Örneğin, elektrikli otobüslerin bataryaları için üretici firmalarla performansa dayalı kiralama/servis anlaşmaları yapmak, belediyenin başlangıç maliyetini düşürecek ve batarya ömrü riskini paylaşacaktır. Latin Amerika'daki başarılı örneklerde (Santiago, Şili gibi) elektrikli otobüsler, *filo sahibi şirket* tarafından satın alınıp işletmeciye hizmet olarak sunulmuş ve böylece kamu üzerinde sermaye yükü azaltılarak geniş ölçekli dönüşüm sağlanabilmiştir. Antalya da benzer biçimde,

özel sektörle işbirliği yaparak “araç kiralama” veya “hizmet alımı” modellerini değerlendirebilir. Ayrıca, orta vadede merkezi hükümetin sağlayabileceği sübvansiyonlar ve vergi indirimleri takip edilmeli; elektrikli toplu taşıma yatırımlarına yönelik çıkabilecek hibe programlarına zamanında başvurulmalıdır. Projenin ekonomik performansı düzenli aralıklarla analiz edilerek (gerçekleşen tasarruflar, bakım maliyetleri vs.), elde edilen kazanımlar tekrar filoya yatırım yapmak için kullanılabilir. Bu döngüsel finansman yaklaşımıyla, tasarrufların yeniden yatırımı prensibi benimsenerek filonun büyütülmesi kendi kendini finanse eden bir yapıya kavuşturulabilir.

Elektrikli otobüs sayısı arttıkça, filo yönetim sistemlerinde gerekli güncellemeler yapılmalıdır. Orta vadede, Antalya’nın toplu taşıma yönetimi, rota planlama ve sefer tarifelerini elektrikli araçların şarj döngülerine göre optimize etmelidir. Gerekirse, yoğun hatlarda gün ortasında kısa şarj molaları planlamak veya az yoğun saatlerde şarj olacak şekilde vardiya çizelgelerini ayarlamak gibi önlemler alınabilir. Bu optimizasyon için gelişmiş telemetri ve araç izleme sistemleri kullanılmalı; her bir otobüsün enerji tüketimi, menzil performansı gerçek zamanlı izlenerek veriler toplanmalıdır. Toplanan bu veriler, hem operasyonel verimliliği artırmak (örneğin, sürüş tarzı eğitimiyle enerji tasarrufu sağlamak) hem de batarya sağlık durumunu takip ederek gerektiğinde bakım/değişim kararları almak için değerlidir. Orta vadede ayrıca, bakım altyapısı güçlendirilmelidir: Elektrikli otobüslerin yüksek voltaj sistemleri ve batarya bakımına yönelik belediye atölyelerinde gerekli ekipman ve yedek parça stokları temin edilmelidir. Üretici firmalarla yapılan bakım anlaşmaları gözden geçirilip uzun vadeli parça tedariki ve teknik destek garantileri alınmalıdır. Böylece büyüyen filo, teknik açıdan güvenli ve verimli bir şekilde işletilmeye devam edecektir. Orta vadede de paydaş iletişimi süreklilik kazanmalıdır. Özellikle elektrikli otobüslerin sayısı arttıkça, kullanıcı memnuniyeti odaklı geri bildirim mekanizmaları işletilmeye devam edilmelidir. Yolcuların görüş ve önerilerini alacak anketler, şikâyet-hata bildirim sistemleri aktif tutulmalıdır. Elde edilen geri bildirimler, hizmet kalitesini iyileştirmede kullanılmalı (örneğin klimaların yeterliliği, duraklardaki şarj bekleme süreleri gibi konular hızla çözüme kavuşturulmalıdır). Sürücüler ve bakım personeli ile düzenli toplantılar yapılarak, onların deneyimleri ve önerileri yönetime aktarılmalı, böylece operasyonel sorunlar büyümeden çözülebilmelidir. Turizm sektörü ile işbirliği orta vadede derinleştirilebilir: Örneğin, tur operatörleri ve otellerle görüşülerek, turist

taşımacılığında elektrikli otobüslerin kullanımı teşvik edilebilir veya belli güzergâhlarda sponsorlu çevre dostu otobüs hatları oluşturulabilir. Bu sayede, özel sektörün de dönüşüme katkı vermesi ve proje sahiplenmesi sağlanır. Genel olarak, orta vadede Antalya'nın elektrikli otobüs dönüşümü, sadece bir ulaşım projesi değil, kentin tüm paydaşlarının benimsediği bir sürdürülebilirlik girişimi haline getirilmelidir.

Uzun Vadeli Adımlar (5+ yıl)

Uzun vadede hedef, Antalya'nın toplu taşıma otobüs filosunun tamamen elektrikli hale gelmesidir. Yaklaşık 5-10 yıllık periyot sonunda, eskiyen tüm dizel otobüslerin yenilenerek elektrikli modellerle değiştirilmesi amaçlanmalıdır. Bu, Antalya'nın 2030'lara yönelik iklim taahhütleriyle de uyumlu bir hedeftir. Uzun vadede sadece belediye otobüsleri değil, taşeron halk otobüsleri ve hatta ilçeler arası çalışan otobüslerin dahi elektrikli modellere dönüşümü teşvik edilmelidir. Böylelikle, kentsel toplu taşıma sistemi bütüncül olarak düşük karbonlu bir yapıya kavuşacaktır. Bu aşamada elektrikli otobüsler, şehirdeki diğer sürdürülebilir ulaşım modlarıyla tam entegre halde çalışmalıdır: Raylı sistemler (tramvaylar) ile senkronize saatler, ortak biletleme sistemleri ve aktarma merkezlerinde şarj olanakları planlanmalıdır. Uzun vadede Antalya, elektrikli otobüslerin yanı sıra mikromobilité (e-scooter, e-bisiklet) ve elektrikli servis araçları gibi diğer sürdürülebilir ulaşım araçlarını da yaygınlaştırarak, kapsamlı bir temiz ulaşım ekosistemi oluşturmayı hedeflemelidir.

Teknoloji hızla gelişmeye devam edeceğinden, uzun vadede Antalya'nın stratejisi esnek ve yeniliklere açık olmalıdır. Batarya teknolojilerinde ortaya çıkabilecek yeni nesil ürünler (daha yüksek enerji yoğunluğu, daha hızlı şarj imkânı gibi) veya alternatif temiz yakıtlar (örneğin, uygun olursa yeşil hidrojen yakıtlı otobüsler) yakından takip edilmelidir. Mevcut elektrikli filo düzeni, bu yeni teknolojileri ileride adapte edebilecek şekilde tasarlanmalıdır (örneğin depo alanlarında gerekli alt yapıyı modüler bırakmak gibi). Uzun vadede, otonom (sürücüsüz) elektrikli toplu taşıma araçları gündeme gelirse, Antalya bu yeniliklere hazır olmak adına akıllı şehir altyapılarını bugünden geliştirmelidir. Akıllı trafik yönetimi, araç-şebeke iletişimi (V2G) gibi kavramlar, elektrikli otobüslerin şebeke ile etkileşim içinde çalışarak hem ulaşım hem enerji sistemine fayda sağlamasına olanak tanıyacaktır. Bu nedenle, şehir şebekesinde akıllı grid uygulamaları teşvik edilmeli; otobüslerin şebekeye geri enerji verebilmesi

veya şebeke dengeleme hizmeti sunabilmesi gibi ileri entegrasyonlar uzun vadeli planlarda yer almalıdır.

Elektrikli otobüs dönüşümünün uzun vadede başarılı olabilmesi için finansal sürdürülebilirlik tamamen sağlanmış olmalıdır. Bu aşamada, elektrikli filonun sağladığı yakıt ve bakım tasarrufları somut olarak bütçeye yansıyor olacaktır. Elde edilen tasarrufların bir kısmı, filosunun yenilenmesi ve genişletilmesinde yeniden yatırıma yönlendirilmelidir. Ayrıca, batarya yenileme döngüsü uzun vadede maliyet getireceğinden, şimdiden her yıl bütçeye batarya yenileme için pay ayrılması veya eski bataryaların ikinci kullanım ve geri dönüşümünden gelir elde etme stratejileri planlanmalıdır. Uzun vadede ulusal karbon piyasaları veya uluslararası karbon kredisi mekanizmaları gelişirse, Antalya bu sistemi kullanarak elektrikli otobüsleri sayesinde azalttığı emisyonları kredilendirip ek finansman kaynağı yaratmayı değerlendirebilir. Finansal anlamda dönüşümün kendi kendini sürdürecektir bir olgunluğa erişmesi için, belediye içinde süreçlerin kurumsallaşması gereklidir. Elektrikli filo yönetimi ile ilgili prosedürler, bakım protokolleri ve insan kaynağı planlaması standart hale getirilmelidir. Ayrıca, belediyenin stratejik plan ve bütçelerine her yıl elektrikli ulaşım hedefleri entegre edilmeli, böylece politik kararlılık uzun vadede de sürdürülmelidir. Uzun vadede, Antalya elektrikli otobüs dönüşümünün sonuçlarını düzenli olarak izlemeli ve raporlamalıdır. Emisyon azaltım miktarları, hava kalitesi göstergeleri, filo performans verileri (km başına enerji tüketimi, araç başına yıllık bakım masrafı vs.) yıllık sürdürülebilirlik raporlarında kamuoyu ile paylaşılmalıdır. Bu sayede şeffaflık sağlanacak ve proje çıktıları hem kent halkı hem yatırımcılar nezdinde görünür olacaktır. Antalya, elde ettiği başarıyı ulusal ve uluslararası platformlarda paylaşarak diğer şehirlere örnek olabilir; bu da kente prestij kazandıracaktır. Özellikle bir turizm kenti olarak, çevreci ulaşım alanında lider konumda olmak Antalya'nın marka değerine pozitif yansıyacaktır. Uzun vadede, sürdürülen izleme ve değerlendirme faaliyetleri sayesinde, ortaya çıkan aksaklıklar veya hedef sapmaları erken tespit edilip gerekli önlemler alınabilir. Bu da projenin dirençliliğini artıracaktır.

Elektrikli otobüs dönüşümü, Antalya'nın sürdürülebilir ulaşım hedeflerinin bir başlangıç noktası olarak görülmelidir. Uzun vadede, şehir ulaşımının tüm boyutlarında düşük karbonlu seçeneklerin payı artırılmalıdır. Otobüslerin elektrifikasyonunun tamamlanmasıyla birlikte, toplu taşımada intermodal entegrasyon (otobüs + tramvay

+ deniz taşımacılığı + mikromobilité) ileri düzeye taşınmalı, vatandaşlar için fosil yakıta bağımlı olmadan her noktaya erişim mümkün kılınmalıdır. Antalya'nın 2050 karbon nötr vizyonu doğrultusunda, ulaşım sektörü kaynaklı emisyonlar tamamen elimine edilmeye çalışılacaktır. Bu kapsamda, uzun vadede şehrin ulaştırma planları sürekli güncellenmeli, yeni teknolojiler ve sosyal ihtiyaçlar doğrultusunda revize edilmelidir. Elektrikli otobüslerin başarıyla entegre edildiği bir Antalya, gelecekte "sıfır karbon" hedefiyle uyumlu, yaşanabilir ve rekabetçi bir küresel şehir olma yolunda emin adımlarla ilerleyecektir.

5.2.1. Sürdürülebilir ulaşım için önerilen politika çerçevesi

Antalya'nın sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşabilmesi için bir dizi entegre politika ve stratejik adım önerilmektedir. Bu öneriler, teknolojik yeniliklerin yanı sıra yönetim, planlama ve uygulama boyutlarını da kapsamaktadır:

Düşük karbonlu ulaşım vizyonunun başarısı, elektrikli otobüs dönüşümünün kent planlarına ve yasal çerçeveye güçlü şekilde entegre edilmesine bağlıdır. Antalya, 2040 Ulaşım Ana Planı'nı ve ilgili alt planları güncelleyerek elektrikli araç geçişini temel bir strateji olarak belirlemelidir. Halihazırda Türkiye'de birçok kent, geleneksel Ulaşım Ana Planlarına ek olarak Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planları (SUMP) hazırlamakta ve yaya, bisiklet, toplu taşıma odaklı entegre planlamaya geçmektedir. Antalya da benzer şekilde ulaşım planlamasında elektrikli otobüslerin filoya katılımı, yeni şarj istasyonlarının konumlanması, ve erişilebilir toplu taşıma hizmetlerini içeren kapsamlı bir planlama yaklaşımını benimsemelidir. Bu sürecin ulusal düzeydeki stratejilerle uyumlu olması önemlidir. Nitekim Ticaret Bakanlığı'nın 2021 tarihli Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planı, şehirlerde elektrikli taşıtların ve şarj altyapısının geliştirilmesini ve toplu taşıma filolarında elektrikli araç kullanımını teşvik etmeyi temel hedefler arasında saymaktadır. Antalya, kendi eylem planlarını oluştururken bu ulusal vizyonu yerel düzeyde somut adımlara dönüştürmelidir. Mevzuat boyutunda ise, belediye toplu taşıma ihalelerinde Çevreye Duyarlı Araç Tercih kriterleri getirmek, yeni alınacak otobüslerin belirli bir oranının elektrikli olmasını şart koşturmak önemli bir politika olacaktır. Ayrıca, Düşük Emisyon Bölgeleri oluşturmak için gerekli hukuki hazırlıklara başlamak da uzun vadede kritik görülmektedir. Avrupa'da birçok kent belirli tarihlerden sonra şehir merkezine dizel

araç girişini yasaklamayı planlamakta, büyük otomotiv üreticileri de 2025 ve sonrası için dizel araç üretimini sonlandırma kararları almaktadır. Bu küresel dönüşüm göz önüne alındığında, Antalya'nın da kent merkezinde fosil yakıtlı araçları kademeli olarak sınırlandıracak düzenlemelere yönelmesi ve böylece elektrikli toplu taşıma yatırımlarını tamamlayıcı talep yönetimi önlemleri alması beklenmektedir.

Elektrikli otobüslere geçiş süreci, yalnızca ulaşım dairesinin değil, çok paydaşlı bir koordinasyonun ürünü olmalıdır. Antalya Büyükşehir Belediyesi içinde Ulaşım, Çevre, İklim Değişikliği, Mali Hizmetler ve Fen İşleri gibi birimler arasında etkin bir işbirliği mekanizması kurulmalıdır. Örneğin, ulaşım planlamacıları ile iklim/enerji uzmanları ortak çalışarak elektrikli otobüslerin güzergâh optimizasyonunu, şarj altyapısının yer seçimini ve enerji ihtiyacının yenilenebilir kaynaklardan karşılanmasını planlayabilir. Antalya Ulaşım A.Ş. (belediyenin toplu taşıma işletmesi) ile Antalya Elektrik Şirketi ve TEİAŞ gibi enerji tedarikçilerinin de dahil olduğu bir çalışma grubu oluşturularak elektrik şebekesinin otobüs şarj talebine hazırlanması sağlanmalıdır. Antalya'nın Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planı'nda da bu tür işbirliklerinin gerekliliği vurgulanmış ve toplu taşıma filolarının enerji etkin araçlarla değiştirilmesi eyleminde Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, yerel ulaşım işletmeleri ve hatta TCDD'nin paydaş olarak yer alması önerilmiştir. Bu, elektrikli otobüslerin mevcut raylı sistemlerle entegrasyonu ve ulusal ulaşım politikalarıyla uyumu açısından önem taşımaktadır. Kurumlararası koordinasyonun bir diğer boyutu da veri paylaşımı ve yönetimidir. Farklı birimlerin elindeki ulaşım verileri, enerji tüketimi ve emisyon verileri ortak bir platformda birleştirilerek karar alma süreçlerinde kullanılmalıdır. Akıllı şehir altyapıları ve Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) bu noktada devreye girerek, gerçek zamanlı trafik ve araç performansı verilerinin izlenmesini ve elektrikli filonun verimli yönetilmesini mümkün kılacaktır. Türkiye'de 2020-2023 Ulusal AUS Stratejisi de sürdürülebilir akıllı hareketlilik için veri temelli uygulamaların geliştirilmesine odaklanmıştır. Antalya, AUS uygulamalarını elektrikli toplu taşıma ile entegre ederek şarj istasyonu durumları, otobüslerin batarya seviyeleri, trafik yoğunluğu gibi bilgileri anlık izleyip, gerektiğinde alternatif rotalama veya yedek araç planlaması yapabilecek bir operasyon merkezini hayata geçirmelidir.

Elektrikli otobüs dönüşümünün başarılı olabilmesi için şarj altyapısının önceden planlanarak hayata geçirilmesi şarttır. Bu kapsamda Antalya genelinde otobüs depoları

ve güzergâh son duraklarında hızlı şarj istasyonlarının kurulacağı noktalar belirlenmelidir. Antalya, halihazırda AB destekli MAtchUP projesi ile 5 adet elektrikli araç şarj istasyonu planlamış ve kurulumuna başlamıştır. Bu deneyim, kenti daha yaygın bir şarj ağı oluşturmaya hazırlamıştır. Şarj altyapısı planlaması, elektrik dağıtım şebekesinin kapasite artışıyla koordineli şekilde yürütülmelidir. Özellikle filo büyüklüğü arttıkça gece depolarda yavaş şarj ve gün içinde fırsat şarjı (opportunity charging) stratejileri geliştirilmeli, gerekirse güneş enerjisi destekli şarj üniteleriyle yenilenebilir elektrik kullanımı maksimize edilmelidir. Antalya gibi güneşlenme süresi yüksek bir şehirde, otobüs garajlarına kurulacak fotovoltaik paneller sayesinde şarj için gerekli enerjinin bir kısmı temiz kaynaklardan üretilebilir; bu da karbon ayak izini daha da düşürecektir. Teknik altyapının bir diğer boyutu da araç bakım ve acil durum hazırlığıdır. Elektrikli otobüsler için uzmanlaşmış bakım atölyeleri oluşturulmalı, itfaiye ve ilk yardım ekipleri batarya kaynaklı kaza ve yangın risklerine karşı eğitilmelidir. Ayrıca sürücülerin elektrikli araç kullanımı ve enerji verimli sürüş teknikleri konusunda kapsamlı eğitimden geçirilmesi, teknolojiye uyum sürecini hızlandıracaktır. Bu teknik hazırlıklar, ilk aşamada maliyetli gibi görünse de uzun vadede işletme giderlerini düşürerek fayda sağlayacaktır. Nitekim literatürde elektrikli otobüslerin uzun vadeli işletme maliyetlerinin dizel araçlara kıyasla daha düşük olduğu ve ekonomik sürdürülebilirliği artırdığı sıkça vurgulanmaktadır. Antalya'nın kendi deneyimleri de bu yönde olmaya başlamıştır; belediye, elektrikli otobüs teknolojisi yaygınlaştıkça birim maliyetlerin hızla düştüğünü ve dizel muadilleriyle fiyat farkının azaldığını rapor etmektedir. Toplu alımlar yapıldığında üretici firmalardan çok daha uygun birim fiyatlar elde edilebildiği, diğer yerel yönetimlerin tecrübeleriyle de sabittir. Dolayısıyla Antalya, teknik altyapı yatırımını bir engel olarak görmek yerine, ölçek ekonomilerinden yararlanarak filoyu yenileme fırsatı şeklinde değerlendirmelidir.

Antalya'nın toplu taşıma filosunun tamamen elektrikliye dönüşümü bir anda gerçekleşemeyeceğinden, geçiş sürecinin iyi yönetilmesi gereklidir. Bu bağlamda, kademeli araç yenileme politikası izlenmelidir: Mevcut dizel ve ekonomik ömrünü doldurmak üzere olan otobüsler öncelikle elektrikli modellerle değiştirilirken, daha yeni ve verimli dizel/CNG otobüsler filoda bir süre daha hizmet verebilir. Antalya Büyükşehir Belediyesi'nin 2020-2024 Stratejik Planı'nda da yer aldığı şekilde, öncelikle araç yaşı büyük olan toplu taşıma araçlarının tespit edilip bunların elektrikli

veya biyoyakıtlı seçeneklerle değiştirilmesine başlanması önerilmektedir. Bu sayede yüksek bakım maliyetine ve emisyonu sahip eski araçlar öncelikle elimine edilmiş olacaktır. Geçiş döneminde, halen kullanımda olan LPG'li ve CNG'li otobüsler ara çözüm olarak değerlidir; zira bu araçlar dizel yakıtlara göre daha düşük karbon yoğunluğuna sahiptir ve ani geçişin ekonomik yükünü hafifletebilir. Ancak bu fosil temelli alternatiflerin uzun vadede yerini sıfır emisyonlu elektrikli otobüslere bırakması hedefinden sapılmamalıdır. Filonun karma (hibrit) yakıt yapısı geçiş döneminde kaçınılmaz ise de, her yeni araç alımında elektrikli oranının artırılmasıyla birkaç yıllık periyotlar sonunda fosil yakıtlı araç sayısı minimuma indirilecektir. Bu süre zarfında elektrikli otobüslerin operasyonel performansını izlemek, şarj altyapısının yeterliliğini değerlendirmek ve gerektiğinde stratejiyi uyarlamak üzere periyodik gözden geçirmeler yapılmalıdır. Örneğin, ilk aşamada sınırlı sayıda hat üzerinde elektrikli araçlar çalıştırılıp deneyim kazanıldıktan sonra, kademeli olarak yüksek yolcu kapasiteli hatlara da yaygınlaştırılabilir. Antalya'da turizm sezonundaki yolcu artışları da dikkate alınarak, yaz aylarında geçici ek sefer veya hatlarda elektrikli araç kullanımı planlanmalı, böylece turist yoğun bölgelerde çevre dostu ulaşım imkânı sunulmalıdır. Özellikle havaalanı, tarihi Kaleiçi bölgesi, sahil şeridi gibi turistik noktalara elektrikli toplu taşıma bağlantıları kurmak, kentin sürdürülebilir turizm imajını da güçlendirecektir. Bu amaçla, turizm sektörüyle işbirliği halinde oteller bölgesine elektrikli shuttle servisleri, kruvaziyer limanı ve müze/örenyeri ulaşımında elektrikli minibüsler devreye alınabilir. Bu tür uygulamalar, düşük karbonlu ulaşımın kent ekonomisine entegre şekilde yaygınlaşmasına katkı sunacaktır.

Elektrikli otobüslerin yaygınlaştırılması, Antalya'nın ulaşımını daha sürdürülebilir kılmak için önemli bir adımdır; ancak tek başına yeterli değildir. Düşük karbonlu ulaşım hedefi, otomobile olan bağımlılığın azaltılmasını da gerektirmektedir. Bu nedenle Antalya, kentsel planlamada "15 Dakikalık Şehir" konsepti gibi yenilikçi yaklaşımları değerlendirerek, vatandaşların günlük ihtiyaçlarını özel araç kullanmadan karşılayabileceği mahalle odaklı bir gelişimi teşvik etmelidir. Böylece gereksiz yolculuk mesafeleri azalarak toplu taşıma talebi daha verimli hale gelecektir. Toplu taşıma, yaya ve bisiklet altyapıları birbirini tamamlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Antalya zaten son yıllarda kent içi raylı sistem yatırımlarını (tramvay hatları) genişletmiş ve bisiklet yolları ile mikromobilité çözümlerini desteklemeye başlamıştır. Bu eğilimi sürdürerek, elektrikli otobüsleri bir omurga olarak düşünmek ve diğer

çevreci ulaşım modlarıyla entegre etmek önemlidir. Örneğin, elektrikli otobüs hatları ile tramvay durakları/bisiklet istasyonları arasında kolay aktarma imkânı sağlanması, toplu taşımada “son kilometre” sorununu azaltacaktır. Ayrıca park ve devam et (park and ride) noktaları oluşturarak, kent çeperlerinde araçlarını bırakan sürücülerin şehir merkezine elektrikli toplu taşıma ile ulaşmasını özendirmek mümkündür. Bunların yanı sıra, kamusal farkındalık kampanyaları ile Antalya halkının ve turistlerin düşük karbonlu ulaşım konusunda bilinçlenmesi sağlanmalıdır. Elektrikli otobüslerin sessiz, konforlu ve çevre dostu olduğu vurgulanarak toplu taşımaya yönelik tutumların olumluya çevrilmesi hedeflenmelidir. Toplu taşıma kullanımını cazip kılmak için dijital uygulamalar, gerçek zamanlı bilgi sistemleri, entegre biletleme gibi yenilikçi hizmetler de devreye alınabilir. Bu tür bütüncül yaklaşımlar sayesinde, önerilen politikalar sadece teknolojik bir dönüşüm olarak kalmayıp, Antalya’nın ulaşım kültüründe kalıcı bir davranış değişikliği yaratabilecektir.

5.2.2. Finansman mekanizmaları ve teşvik sistemleri

Elektrikli otobüslere geçiş ve ilgili altyapı yatırımları, yüksek başlangıç maliyetleri gerektirdiğinden, sürdürülebilir finansman stratejilerinin geliştirilmesi hayati önem taşır. Antalya için gerçekçi ve çeşitlendirilmiş finansman modelleri ile teşvik mekanizmaları aşağıda değerlendirilmektedir:

Türkiye’nin AB katılım sürecine yönelik mali aracı olan AB IPA (Instrument for Pre-Accession) fonları, sürdürülebilir ulaşım projeleri için önemli bir hibe kaynağı olabilir. IPA kapsamındaki Çevre ve İklim programları, kentlerin düşük karbonlu altyapı yatırımlarına destek vermektedir. Örneğin, Türkiye’de bazı belediyeler AB destekli projelerle bisiklet yolları, sürdürülebilir ulaşım planları ve temiz ulaşım araçları yatırımları gerçekleştirmiştir. Antalya da IPA fonlarına yönelik projeler geliştirerek elektrikli otobüs alımları, şarj istasyonu kurulumları veya akıllı ulaşım sistemleri entegrasyonu için hibe desteği arayabilir. Nitekim Antalya, AB Horizon 2020 programından aldığı hibe ile MATchUP projesini yürütmüş ve bu sayede elektrikli araçları filosuna katabilmiştir (Fural, 2019). Gelecek IPA dönemlerinde şehir ulaşımının karbon azaltımını hedefleyen projeler öncelikli olacak; Antalya’nın halihazırda hazırladığı Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planı gibi strateji belgeleri, AB fonlarını çekebilmek için önemli bir temel teşkil edecektir. Ayrıca,

UFUK Avrupa ve LIFE programları gibi AB'nin araştırma ve çevre fonları da pilot teknolojilerin uygulanması, enerji verimliliği ve iklim uyumu projeleri için finansman sağlayabilir. Antalya, üniversiteler ve sivil toplum ile işbirliği yaparak uluslararası fon kaynaklarına erişimini artırmalıdır.

Başta Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası (EBRD) olmak üzere, Dünya Bankası, Asya Altyapı Yatırım Bankası (AIIB) ve Avrupa Yatırım Bankası (EIB) gibi kalkınma finans kuruluşları, sürdürülebilir kentsel ulaşım projelerine uygun koşullu krediler sunmaktadır. EBRD'nin "Yeşil Şehirler" programı kapsamında Ankara ve İzmir gibi büyükşehirlerde toplu taşıma yatırımlarına finansman sağlandığı bilinmektedir. Örneğin, EBRD 2021 yılında Ankara'ya çevreci otobüs filosu temini için kredi desteği verirken, İzmir'de yeni metro hattının inşasını 125 milyon Avro kredi ile desteklemiştir. Bu tür krediler, uzun vadeli düşük faizli yapılarıyla belediyeler için cazip olup geri ödemeyi toplu taşıma işletmesindeki tasarruflarla dengelemeyi mümkün kılar. Antalya, elektrikli otobüs filosunu büyütmek için EBRD'nin yanı sıra Fransız Kalkınma Ajansı (AFD), Alman Kalkınma Bankası (KfW) gibi kurumların da kapısını çalabilir. Kalkınma bankaları genellikle projelerin hazırlık aşamasında teknik destek (proje danışmanlığı, fizibilite hibesi vb.) da sağlayarak projenin başarısını artırmaktadır. Burada önemli olan, Antalya'nın sağlam bir iş planı ve fizibilite çalışması ile kredi başvurularını hazırlamasıdır. Elektrikli otobüs projesinin iklim faydalarını (yıllık CO2 azaltımı, hava kalitesi iyileşmesi) ve ekonomik getirisini (yakıt tasarrufu, bakım maliyeti avantajı) ortaya koyan analizler, uluslararası finansman sağlama olasılığını yükseltecektir. Ayrıca bu kuruluşların çoğu, finansman sağladıkları projelerde çevresel ve sosyal standartlara uyumu şart koşar; Antalya'nın proje tasarımını bu standartlara göre yapması (ör. eski araçların çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesi, paydaş katılımının sağlanması) gerekecektir (Fural, 2019).

Küresel iklim finansmanı mekanizmaları, düşük karbonlu ulaşım projelerini desteklemek üzere fırsatlar sunmaktadır. Yeşil İklim Fonu (Green Climate Fund, GCF) ve Küresel Çevre Fonu (GEF) gibi uluslararası iklim fonları, gelişmekte olan ülkelerde sera gazı azaltımına yönelik projelere hibe veya uygun krediler verebilmektedir. Özellikle GEF'in geçmişte Türkiye'de sürdürülebilir ulaşım alanında (örneğin İstanbul'da elektrikli otobüs demonstrasyonları veya bisiklet yolları gibi) hibeler sağladığı görülmüştür. Antalya, elektrikli otobüs dönüşümü projesini ulusal hükümet

aracılığıyla bu fonlara sunarak ek finansman yaratmayı hedefleyebilir. Öte yandan, karbon kredisi mekanizmaları da dikkate değerdir. Türkiye, Paris Anlaşması'nı onaylayarak 2053 net-sıfır hedefini açıklamıştır ve ulusal düzeyde bir emisyon ticaret sistemi kurulması gündemdedir. İleride karbon piyasası devreye girdiğinde, Antalya Belediyesi elektrikli otobüs projesiyle elde ettiği emisyon azaltımlarını sertifikalandırıp satma imkanına kavuşabilir. Her bir dizel otobüsün elektrikli ile değiştirilmesinden kaynaklanan CO2 azaltımı, karbon kredisi olarak gelir getirmese bile, sonuç odaklı finansman (Results-Based Climate Finance) programları kapsamında ödüllendirilebilir. Örneğin, Dünya Bankası'nın bazı programları gerçekleşen emisyon azaltımları karşılığında ödeme yapmaktadır. Bu tür yenilikçi finansman araçları henüz Türkiye'de yaygın olmamakla birlikte, Antalya şimdiden proje ölçümlerini ve izleme sistemini kurarak ileride oluşabilecek karbon finansmanı fırsatlarına hazır olmalıdır. Son olarak, ikili işbirliği fonları (ör. İskandinav ülkelerinin karbon azaltım hibeleri, Birleşmiş Milletler'in iklim programları) da takip edilerek uygun çağrılara başvurular yapılabilir.

Elektrikli otobüs yatırımlarında özel sektörün dinamizminden yararlanmak, finansman yükünü hafifletebilmektedir. Bir kamu-özel ortaklığı modeli, örneğin “araç kiralama/leasing ve işletme” şeklinde kurgulanabilir. Antalya Büyükşehir Belediyesi, elektrikli otobüsleri doğrudan satın almak yerine, bir özel şirketten belirli bir süreliğine kiralama yoluna gidebilir; nitekim mevcut durumda 2 elektrikli otobüs leasing yöntemiyle temin edilmiştir (<https://antalya.bel.tr>). Bu modelde başlangıç sermayesi özel taraftan çıkarken, belediye düzenli kira ödemeleri ile maliyeti zamana yayar ve teknoloji risklerini (batarya ömrü, ikinci el değeri vb.) kısmen özel sektörle paylaşır. Bir başka Kamu-Özel Ortaklığı yaklaşımı da işletme hakkı devri olabilir: Özel bir otobüs işletmecisi, hat işletme sözleşmesi kapsamında kendi elektrikli otobüslerini getirip çalıştırabilir ve bilet gelirlerinin bir kısmını alarak yatırımını geri kazanabilir. Antalya'da halihazırda özel halk otobüsleri sistemi bulunduğu düşünüldüğünde, ileride bu özel taşımacıların filolarını elektrikli araçlarla yenilemelerini teşvik edecek düzenlemeler yapılabilir (örneğin lisans yenileme dönemlerinde elektrikli araç şartı konulması ve geçiş sürecinde sübvansiyonlar sağlanması). Şarj istasyonu yatırımları da KÖO için uygun alanlardandır; enerji şirketleri veya teknoloji firmaları, Antalya'daki stratejik noktalara kuracakları şarj istasyonlarını hem toplu taşıma hem kamu kullanımı için işletip gelir elde edebilir. Belediye, bu şirketlere uygun alan

tahsisi ve lisans kolaylığı sağlayarak altyapı maliyetini üzerlerinden atmış olur. Türkiye’de 2022’de yürürlüğe giren yeni düzenlemelerle elektrikli araç şarj istasyonu kurulumu ve işletmesi özel sektör için serbestleştirilmiş, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) lisansları verilmeye başlanmıştır. Bu sayede özel firmalar AVM otoparkları, akaryakıt istasyonları ve yol kenarı park yerlerine şarj ünitesi kurabilmektedir. Antalya, bu gelişmeyi toplu taşıma altyapısına uyarlayarak, otobüs depoları veya son duraklara yakın ticari alanlarda özel yatırımcılarla işbirliğine gidebilir. KÖO modellerinin başarısı için sözleşme şartlarının adil ve şeffaf belirlenmesi, hizmet kalitesinin belediye tarafından denetlenmesi önemlidir. İyi tasarlanmış bir KÖO, hem finansmanı kolaylaştırır hem de teknolojik uzmanlığı kente çekebilir (örneğin bir elektrikli otobüs üreticisinin Antalya’da bakım merkezi kurması gibi yan faydalar da doğurabilir).

Büyükşehir belediyelerinin küresel sermaye piyasalarından finansman temin etmek için kullandığı yenilikçi yöntemlerden biri yeşil tahvil ihraç etmektir. Yeşil tahviller, elde edilen fonların yalnızca çevresel sürdürülebilirlik projelerinde kullanılacağı taahhüdüyle ihraç edilen borçlanma senetleridir. Türkiye’de bu alandaki ilk örnek, 2021’de İstanbul Büyükşehir Belediyesi’nin yaklaşık 580 milyon dolarlık yeşil eurotahvil ihracı olmuştur; 2028 vadeli bu tahvil, ulaştırma ve metro projeleri gibi yeşil altyapı yatırımlarını finanse etmek amacıyla çıkarılmıştır . İstanbul’un ardından İzmir Büyükşehir Belediyesi de benzer finansman arayışlarına girmiştir. Antalya Büyükşehir Belediyesi’nin de mali yapısını güçlendirmesi ve uluslararası kredi notunu geliştirmesi durumunda, yeşil tahvil ihraç edebilmesi orta vadede mümkündür. Özellikle elektrikli otobüs filosu ve güneş enerjili şarj tesisleri gibi projeler, bir yeşil yatırım paketi olarak tanımlanıp tahvil yatırımcılarına sunulabilir. Tahvil ihracı için Hazine ve Maliye Bakanlığı’nın onayı ve belirli yasal süreçler gerekmeyle birlikte, Türkiye’de şehirlerin borçlanma kabiliyetine yönelik yasal düzenlemeler esneklik kazanmaya başlamıştır. Ayrıca, Antalya gibi turizm gelirleri yüksek bir kentin projelerine uluslararası yatırımcılar ilgi gösterebilir, zira yeşil tahviller global ölçekte talep gören ve prestij kazandıran enstrümanlardır. Bunun alternatifi olarak, Antalya Büyükşehir Belediyesi bağlı kuruluşu veya İlbank üzerinden de yeşil sukuk/tahvil ihraçları değerlendirilebilir. Nitekim İller Bankası, belediyelere çevreci projeler için kredi sağlamak üzere uluslararası finans kurumlarıyla anlaşmalar yapmakta ve hatta kendi sürdürülebilir tahvil ihracını planlamaktadır (<https://finansman.ibb.istanbul>).

Dış finansman olanaklarının yanı sıra, Antalya'nın kendi gelir ve teşvik mekanizmalarını harekete geçirmesi de önemlidir. Otopark gelirleri, bu kapsamda ilk akla gelen kaynaktır. Antalya Büyükşehir Belediyesi, kent merkezindeki otopark ücretlerini belirlerken elde edilen gelirin bir kısmını toplu taşıma iyileştirmelerine tahsis edecek şekilde bütçesini yönlendirebilir. Özellikle turizm sezonunda araç trafiğinin arttığı düşünüldüğünde, otopark ücretlendirmesinin hem talep yönetimi aracı hem de gelir kaynağı olarak kullanılması uygun bir stratejidir. Benzer şekilde, trafik sıkışıklığı ücretleri veya kent merkezine giriş ücreti gibi uygulamalar uzun vadede gündeme alınabilir; bu sayede hem şehir merkezinde özel araç kullanımı caydırılır hem de elde edilen fonlar elektrikli toplu taşıma yatırımlarına aktarılır. Ancak bu tür radikal uygulamalar için kamuoyu desteği ve yasal düzenleme gerektiğinden, kısa vadede daha uygulanabilir görünen çevre vergileri değerlendirilebilir. Örneğin, turistik konaklama tesislerinden sembolik düzeyde alınacak “yeşil şehir katkı payı” veya havaalanı çıkışında talep edilebilecek küçük bir çevre ücreti, oluşturulacak bir İklim ve Ulaşım Fonuna aktarılabilir. Birçok turizm kentinde ziyaretçilerden alınan sürdürülebilirlik vergileri benzer amaçlarla kullanılmaktadır. Antalya da yerel düzeyde böyle yenilikçi finansman araçlarını araştırmalıdır. Reklam ve sponsorluk gelirleri de bir diğer kalemdir. Toplu taşıma durakları, otobüs giydirme reklamları, durak isim hakkı satışları gibi yöntemlerle elde edilen gelirler, doğrudan elektrikli otobüs filo yenileme fonuna aktarılabilir. Örneğin, yeni alınacak her bir elektrikli otobüse bir şirket sponsor bulunarak, belirli bir bedel karşılığında aracın reklam kaplaması yapılması sağlanabilir. Bu model, özellikle çevre konusunda duyarlılık göstermek isteyen kurumsal firmalar için cazip olacaktır.

Teşvikler konusuna gelince; Antalya Büyükşehir Belediyesi, kendi bütçesinden veya merkezi idareden gelecek kaynaklarla, elektrikli araç dönüşümünü hızlandıracak bazı teşvik programları uygulayabilir. Örneğin, özel halk otobüsü işletmecilerine elektrikli araca geçmeleri halinde yakıt sübvansiyonu veya şarj istasyonu kurulumu desteği verilebilir. Yine toplu taşımada elektrikli araç kullanan kooperatif veya şirketlere vergi/harç indirimi gibi kolaylıklar tanınabilir. Türkiye genelinde elektrikli araçlar için halihazırda Motorlu Taşıtlar Vergisi muafiyeti, ÖTV indirimi gibi teşvikler uygulanmaktadır; benzer şekilde elektrikli otobüslerin ilk alımında gümrük vergisi muafiyeti, KDV indirimi gibi destekler sağlanması için merkezi düzeyde girişimlerde bulunulmalıdır. Belediyeler, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı ile Çevre, Şehircilik ve

İklim Değişikliği Bakanlığı nezdinde lobi faaliyetleri yürüterek, ulusal bütçeden düşük karbonlu ulaşımı teşvik edici özel ödenekler ayrılmasını talep edebilir. Özellikle 81 il için hazırlanan İklim Değişikliği Eylem Planları ve yakın gelecekte yürürlüğe girmesi beklenen İklim Kanunu çerçevesinde, kent içi düşük emisyonlu ulaşım projelerinin desteklenmesi gündeme gelecektir. Antalya, bu süreçte pilot ve örnek bir şehir olarak konumlanıp, merkezi fon ve teşviklerden öncelikli faydalanma imkânına sahip olabilir.

5.2.3. Çok paydaşlı katılım ve toplumsal farkındalık stratejileri

Elektrikli otobüs dönüşümünün Antalya ili özelindeki başarısı, teknik ve finansal planlamanın ötesinde paydaş katılımı ve kamuoyu desteğine doğrudan bağlıdır. Sürdürülebilir ulaşım girişimlerinin etkili olması, güçlü bir politika çerçevesinin yanı sıra toplumun aktif katılımını gerektirmektedir. Literatürde de vurgulandığı üzere, ulaşım projelerinde paydaşları sürece dahil etmek bir tercih değil zorunluluktur; önemli olan *ne zaman* ve *nasıl* katılım sağlanacağıdır. Tüm etkilenen grupların görüş ve geri bildirimlerinin alınması, planlama ve uygulama süreçlerinin daha kapsayıcı ve esnek olmasını sağlamaktadır. Nitekim erken aşamada katılımın teşvik edilmesi, projeden etkilenen topluluklar için daha fazla toplumsal fayda yaratmakta ve projelerin benimsenmesini kolaylaştırmaktadır (Eryiğit, 2020). Bu nedenle, elektrikli otobüslere geçiş sürecinde paydaşlar arası etkin bir iletişim ve iş birliği mekanizması kurulması kritik önemdedir.

Antalya’da elektrikli otobüs projesinin başlıca paydaş grupları, kamusal, özel ve sivil sektörün geniş bir kesimini kapsamaktadır: Antalya Büyükşehir Belediyesi’nin Ulaşım Planlama, Ulaşım A.Ş., Çevre Koruma gibi ilgili birimleri stratejilerin belirlenmesi ve uygulanmasında lider konumdadır. Politika geliştirme, bütçeleme, altyapı yatırımları ve diğer paydaşlar arası koordinasyon belediyenin sorumluluğundadır. Belediye, proje için bir yönlendirme kurulu veya koordinasyon ofisi oluşturarak tüm aktörlerin uyum içinde çalışmasını sağlamalıdır. Bu kapsamda belediye, hem teknik planlamayı yapacak hem de toplumsal faydayı maksimize edecek kararları almak üzere diğer paydaşları sürece entegre edecektir.

Akdeniz Üniversitesi ve bölgedeki diğer üniversiteler ile AR-GE kuruluşları, bilimsel destek ve uzmanlık sağlamaktadır. Bu paydaşlar fizibilite çalışmaları, çevresel etki

analizleri, fayda-maliyet analizleri ve teknolojik değerlendirmeler yaparak karar alıcıları bilgilendirmektedir. Akademik iş birliği sayesinde, proje bilimsel verilere dayalı ilerler ve yenilikçi çözümler entegre edilir. Üniversiteler ayrıca kamuoyu eğitiminde ve farkındalık kampanyalarında da içerik desteği sunabilmektedir.

Antalya’da toplu taşıma hizmetlerinin önemli bir kısmını yürüten halk otobüsü kooperatifleri ve Antalya Ulaşım A.Ş. gibi işletmeler, dönüşümün operasyonel uygulayıcılarıdır. Bu gruplar, mevcut otobüs filolarının elektrikli araçlarla yenilenmesi, şoför ve bakım personelinin eğitimi, günlük operasyonların planlanması gibi konularda birincil derecede etkilenecektir. Bu nedenle, kooperatiflerin ve işletmecilerin karar süreçlerine erken aşamada dahil edilmesi, onların endişe ve önerilerinin dikkate alınması gerekmektedir. Örneğin, elektrikli otobüslere geçişte işletmecilerin ekonomik kaygılarını gidermek için uygun teşvik mekanizmaları ve finansman modelleri (bölüm 5.4.2’de tartışıldığı üzere) geliştirilebilir. Kooperatif temsilcilerinin yönlendirme kurullarında yer alması, sürece dair sahiplenme duygusunu artıracaktır.

Otobüs üreticileri (ör. yerli üreticiler TEMSA, Bozankaya vb.), batarya ve şarj teknolojisi sağlayıcıları, yazılım ve akıllı sistem firmaları ile enerji sektörü yatırımcıları proje paydaşları arasındadır. Bu firmalar elektrikli otobüs temini, şarj altyapısının kurulumu ve akıllı filo yönetim sistemlerinin entegrasyonu konularında kritik rol oynamaktadır. Özel sektör, kamu-özel iş birliği modelleri çerçevesinde sürece dahil edilebilir; örneğin, otobüs üreticileri ile bakım ve eğitim konusunda uzun vadeli iş birliği anlaşmaları yapılması veya enerji şirketleriyle şarj istasyonu yatırımları için ortaklıklar kurulması gibi. Özel sektörün yenilikçi kapasitesi, projenin teknolojik açıdan sürdürülebilir olmasına katkı sağlayacaktır.

Elektrikli otobüslerin şarj altyapısı için bölgedeki elektrik dağıtım şirketi ve varsa yenilenebilir enerji sağlayıcıları da paydaştır. Akdeniz Elektrik Dağıtım A.Ş. gibi kurumlar, şebeke kapasitesinin planlanması, şarj ünitelerinin kurulumu ve işletimi, elektrik talebinin yönetimi konularında belediye ile koordinasyon halinde olmalıdır. Mümkünse, otobüslerin ihtiyacını karşılamak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr gibi) entegrasyonu planlanarak projenin karbon ayak izi azaltılabilir.

Enerji firmalarının sürece erken katılımı, ileride ortaya çıkabilecek teknik darboğazların (ör. şebeke aşırı yüklenmesi) önüne geçecektir.

Çevre ve ulaşım alanında faaliyet gösteren STK'lar (ör. sürdürülebilir ulaşım dernekleri, çevre platformları) ile mahalle düzeyindeki topluluk temsilcileri, projenin hem destekleyicisi hem de bağımsız denetleyicisi olabilir. Bu gruplar, projenin çevresel faydalarını vurgulayarak kamuoyunda bilinç oluşturabilir, aynı zamanda uygulama sırasında ortaya çıkabilecek sosyal sorunlara (ör. belirli bölgelerin hizmet alamaması gibi) dikkat çekebilir. STK'lar ve vatandaş platformları, katılımcı planlama süreçleriyle karar alma mekanizmalarına dahil edilmelidir. Örneğin, önemli güzergâh veya hizmet değişikliklerinde halk toplantıları, çalıştaylar düzenlenerek yerel halkın görüşleri alınabilir. Bu sayede, halkın endişeleri erken safhada anlaşılır ve projeye duyulan güven artar.

Antalya bir turizm kenti olduğu için otel işletmeleri, turizm acenteleri ve esnaf odaları da dolaylı paydaşlar arasındadır. Turizm sektörü, kentin çevre dostu ulaşım çözümlerine yönelmesini destekleyerek, Antalya'nın sürdürülebilir ve temiz bir destinasyon imajını güçlendirmeye istekliyse projeye kaynak ve tanıtım desteği verebilir. Örneğin, bazı turizm tesisleri ile iş birliği yapılarak turist yoğun bölgelerde elektrikli shuttle hizmetleri pilot olarak başlatılabilir. Bu sektörün beklenti ve önerileri, özellikle yaz aylarındaki yoğun sezon taşımacılığı için önemlidir.

Yerel basın, televizyon ve dijital medya, elektrikli otobüs projesinin tanıtımı ve halkın bilinçlendirilmesi açısından kritik bir paydaştır. Medya aracılığıyla proje hakkında şeffaf bilgilendirme yapılması, başarı hikâyelerinin anlatılması ve olası yanlış algıların düzeltilmesi mümkündür. Antalya özelinde, yerel gazeteler ve belediyenin iletişim kanalları düzenli bilgilendirme yaparak halkın projeye dair gelişmelerden haberdar olmasını sağlamalıdır. Medya aynı zamanda kamuoyu nabzını tutarak geri bildirim mekanizması işlevi görebilir.

Paydaşlar arası iş birliği modelleri ve yönetim stratejileri geliştirmek, projenin koordineli ilerlemesinin güvencesidir. Çok paydaşlı bir girişim olan elektrikli otobüs dönüşümü için “ortak yönetim” yaklaşımı benimsenmelidir. Belediyenin liderliğinde, tüm önemli paydaşların temsilcilerinden oluşan bir Yürütme/Koordinasyon Kurulu

oluşturulabilmektedir. Bu kurul, düzenli toplantılarla proje ilerlemesini değerlendirir, sorunları tartışır ve birlikte karar alır. Katılımcı yönetim, şeffaflık ve hesap verebilirliği artırır. Ayrıca alt çalışma grupları kurulabilir: Örneğin *Teknik Çalışma Grubu* (belediye teknik ekibi, üniversite uzmanları, enerji firması temsilcileri) altyapı ve araç teknolojisi konularını ele alırken, *Sosyal Etki ve İletişim Grubu* (STK'lar, medya, halkla ilişkiler birimi) halkın bilgilendirilmesi ve geri bildirimlerin alınması konularına odaklanabilir. Bu tür yatay iş birliği yapıları, karar alma sürecini yavaşlatmadan her paydaşın sesinin duyulmasına olanak tanımaktadır.

Yönetişim stratejileri bağlamında, Antalya'da uygulanabilecek bir diğer model kamu-özel-toplum ortaklığı yaklaşımıdır. Klasik kamu-özel ortaklıklarından farklı olarak, bu modelde sivil toplum da sürece entegre edilmektedir. Örneğin, belediye ile otobüs üreticisi bir firma arasında elektrikli otobüs alımı ve bakımına dair bir finansal ortaklık kurulurken, halk temsilcilerinin de proje değerlendirme süreçlerinde yer alması sağlanabilir. Bu üçlü yapı, projeye finansal sürdürülebilirlik kazandırırken toplumsal kabulü de artıracaktır. Paydaş katılımının başarıyla sağlanması için etkili iletişim ve bilinçlendirme şarttır. Halkın projeye ilişkin farkındalığını yükseltmek ve benimsemeyi artırmak amacıyla çok yönlü bir halkı bilinçlendirme ve katılım planı uygulanmalıdır. Bu plan kapsamında kullanılabilecek fiziksel ve dijital katılım mekanizmaları şunlardır:

Projenin amaçları, faydaları ve aşamaları hakkında halkı bilgilendirmek üzere kapsamlı kampanyalar düzenlenmelidir. Kitle iletişim araçları, sosyal medya ve belediye duyuru kanalları üzerinden düzenli bilgilendirmeler yapılarak, elektrikli otobüslerin çevresel ve ekonomik avantajları anlatılabilmektedir. Örneğin, yerel televizyon programlarında uzman konuklar aracılığıyla proje tartışılabilir, gazetelerde sıkça sorulan soruların yanıtladığı köşeler yayınlanabilir. Bu sayede yanlış bilgi ve direnç azaltılarak, toplumun geniş kesimlerinde projenin algılanan faydası artırılır.

Halkın doğrudan katılımını sağlamak için mahalle bazında veya kentin farklı kullanıcı gruplarına yönelik (öğrenciler, yaşlılar, turizm çalışanları vb.) eğitim seminerleri ve atölyeler düzenlenebilir. Bu etkinliklerde, düşük karbonlu ulaşımın önemi, elektrikli otobüslerin çalışma prensipleri, emisyon azaltımına katkısı gibi konular interaktif şekilde anlatılabilir. Üniversitelerin ve STK'ların da katkısıyla hazırlanacak bu eğitim

programları, halkı hem bilinçlendirecek hem de soru-cevap ortamıyla katılımcı bir platform sunacaktır. Özellikle genç nesilde çevre bilincini pekiştirmek için okullar ve üniversitelerde tematik etkinlikler yapmak uzun vadede davranış değişikliğini desteklemektedir.

Günümüzde dijital araçlar, geniş kitlelere ulaşmada etkilidir. Belediye, projeye özel bir web sitesi veya mobil uygulama geliştirerek halkın anlık bilgi almasını ve geri bildirim vermesini mümkün kılmaktadır. Bu platform üzerinden projenin zaman çizelgesi, gerçekleştirilen adımlar, elde edilen başarılar görselleştirilerek paylaşılabilir. Vatandaşlar, karşılaştıkları sorunları bildirmek veya öneriler sunmak için bu dijital kanal üzerinden formlar doldurabilmektedir. Ayrıca sosyal medyada anketler düzenlenerek halkın görüşleri toplanabilir. Örneğin, yeni kurulacak şarj istasyonlarının yerleri konusunda bir çevrimiçi anketle halkın tercihi öğrenilebilir. Dijital katılım, coğrafi olarak geniş bir alana yayılmış Antalya halkına hızlı ve düşük maliyetli şekilde ulaşmayı sağlamaktadır.

Önemli kararlar öncesinde, örneğin güzergâh planlaması veya tarifelerde yapılacak değişiklikler öncesinde çalıştaylar ve arama konferansları düzenlenebilir. Bu yüz yüze etkinliklere, mahalle muhtarları, kooperatif temsilcileri, engelli dernekleri, bisikletli ulaşım grupları gibi farklı kesimlerden katılımcılar davet edilerek birlikte çözüm aranmaktadır. Katılımcı planlama yaklaşımı, halkın proje üzerindeki sahiplenme duygusunu artırır ve “bu ulaşım sistemi bizim ortak eserimiz” düşüncesini pekiştirmektedir. Medellín kentinin dönüşümünde görüldüğü gibi, kentsel projelerde yaratıcı katılım teknikleri yerel halkı sürece dahil ederek başarı şansını yükseltmektedir (Töre ve Çağlayan, 2018).

Pilot olarak devreye alınacak elektrikli otobüs hatları veya araçları, halkın projeyi deneyimlemesi için fırsat sunmaktadır. Antalya’da örneğin bir veya iki hatta pilot elektrikli otobüs servisi başlatıldığında, bu hatları kullanan yolcularla anketler yapılarak memnuniyetleri ve önerileri alınabilir. Ayrıca pilot araçların tanıtımı için halk günleri düzenlenebilir. Bu tür deneyimsel katılım yöntemleri, halkın teknolojiye aşinalığını ve güvenini artırır. Pilot sürecinde elde edilen geri bildirimler, tam ölçekli geçiş öncesi değerli veriler sağlayacaktır.

Halkın projeye desteğini kazanmak için duygusal motivasyonlar da kullanılabilir. Örneğin, elektrikli otobüs şoförleri veya projeden fayda gören vatandaşlarla röportajlar yapıp başarı hikâyeleri şeklinde medya içerikleri oluşturulabilir. “Daha temiz bir Antalya için birlikte yol alıyoruz” gibi sloganlarla kampanyalar düzenlenerek, proje bir şehir gururu haline getirilebilir. Yerel basında, sosyal medyada ve hatta açık hava reklamlarında bu pozitif mesajların sürekli vurgulanması, halkın dönüşümü benimseme hızını artıracaktır. Bu mekanizmaların etkin kullanımı, halkın projeye katılımını ve benimsemesini önemli ölçüde artıracaktır. Nitekim, gelişmekte olan kentlerde sürdürülebilir ulaşım politikalarının hayata geçirilmesinde kamuoyu desteği şarttır; doğru hedef kitleye, doğru mesaj ve yöntemlerle ulaşmak başarılı bir dönüşümün kilit bileşenidir. Antalya özelinde, yüksek nüfus ve turist etkileşimi göz önüne alındığında, çok dilli ve kültürel olarak duyarlı iletişim stratejileri de gerekebilir (örn. yabancı turistlere yönelik İngilizce bilgilendirmeler). Sonuç olarak, kapsamlı ve katılımcı bir paydaş iletişim planı ile desteklenen elektrikli otobüs projesi, sadece bir teknolojik dönüşüm değil, aynı zamanda toplumsal bir dönüşüm olarak kök salacaktır.

5.2.4. Aşamalı uygulama planı ve zaman çizelgesi

Antalya’da elektrikli otobüslere geçiş, kısa, orta ve uzun vadeli olarak planlanması gereken çok aşamalı bir süreçtir. Başarılı bir dönüşüm için, her bir aşamanın net hedefleri, sorumlu kurumları, ihtiyaç duyulan kaynakları ve izleme mekanizmaları tanımlanmalıdır. Bu bölümde, elektrikli otobüs dönüşüm süreci için önerilen uygulama takvimi ve aşamalar sunulmakta; her aşama için görev dağılımı ve izleme yöntemi tartışılmaktadır. Genel olarak, kapsamlı filoya sahip bir şehirde tüm otobüs filosunun elektrikliye dönüşümü, filonun yenilenme döngüsüne bağlı olarak yaklaşık 10 yıllık bir ufuk olarak öngörülebilir. Ancak bu süre, atılacak adımların kararlılığı ve elde edilecek finansmanla kısalabilir veya uzayabilir. Aşağıda, planlama (kısa vadeli), pilot ve kademeli geçiş (orta vadeli) ve tam uygulama (uzun vadeli) olmak üzere üç temel aşama halinde bir yol haritası sunulmaktadır.

İlk aşamada dönüşümün stratejik planlaması yapılır ve uygulama için gerekli ön koşullar hazırlanır. Bu dönem, detaylı planlama, paydaş anlaşmaları ve altyapı hazırlıklarını kapsar. Öncelikle Antalya Büyükşehir Belediyesi, ilgili tüm paydaşlarla koordinasyon halinde bir *Elektrikli Ulaşım Strateji Planı* hazırlar. Bu planda,

dönüşümün hedefleri (ör. “2030 yılına kadar tüm otobüs filosunun %100 elektrikli olması” gibi ölçülebilir hedefler) ve bu hedeflere ulaşmak için izlenecek yol tanımlanır. Kurumsal sorumluluk dağılımı yapılır: belediye stratejik lider, ulaşım işletmeleri uygulayıcı, enerji firması teknik destek sağlayıcı vb. rollerini resmi olarak üstlenmektedir. Finansman temini için ulusal ve uluslararası kaynak araştırması bu dönemde gerçekleştirilir; örneğin Avrupa Birliği hibe programları, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı fonları veya kamu-özel ortaklığı imkanları değerlendirilir. Altyapı hazırlığı kapsamında, mevcut otobüs depolarının elektrikli araçlara uygun hale getirilmesi planlanır: şarj istasyonlarının tasarımı ve konum seçimi yapılır, şebeke kapasite analizi gerçekleştirilir. Bu teknik hazırlıklar için enerji dağıtım şirketi ile iş birliği içinde çalışılır. Ayrıca yasal ve idari düzenlemeler gözden geçirilir; elektrikli araçların entegrasyonunda gerekli olabilecek yerel yönetmelik değişiklikleri (örneğin, şarj istasyonlarının kamusal alan kullanımı) saptanmaktadır.

Kısa vadede bir diğer önemli adım, insan kaynağı planlaması ve eğitimidir. Elektrikli otobüs teknolojisi, geleneksel dizel araçlardan farklı beceriler gerektireceğinden, bu aşamada otobüs bakım personeli ve sürücüler için eğitim programları tasarlanır. Üniversitelerin ve üretici firmaların katkısıyla teknik atölyeler, simülasyon eğitimleri yapılabilir. Kurumsal kapasite geliştirme de bu döneme dahildir: belediye bünyesinde bir *Elektrikli Ulaşım Birimi* kurulması ve gerekli uzmanların istihdamı gibi adımlar atılabilir.

İzleme mekanizmaları bakımından, henüz uygulamanın başında olduğundan, bu aşamada odak, planlama faaliyetlerinin takvimine uygun ilerleyip ilerlemediğini takip etmektir. Proje yönetim ofisi, hazırlanacak ayrıntılı iş planına göre kilometre taşlarını (milestone) belirlemekte ve düzenli raporlama yapmaktadır. Örneğin, “İlk yıl sonunda 5 şarj istasyonunun kurulum ihalesine çıkılacak” gibi somut hedefler izlenir. Ayrıca, başlangıç aşamasında bir başlangıç performans göstergeleri seti tanımlanmakta: mevcut dizel otobüs filosunun yıllık yakıt tüketimi, karbon emisyonu, ortalama işletme maliyeti gibi veriler toplanarak bir *başlangıç referans değeri* oluşturulmaktadır. Bu, ileride elektrikliye geçişin getirdiği iyileşmelerin ölçülmesi için gereklidir. Kısa vadeli aşama sonunda, planlama ve hazırlık faaliyetlerinin öngörüldüğü biçimde tamamlanıp tamamlanmadığı üst yönetim (belediye ve ilgili kurul) tarafından değerlendirilir. Gerekirse stratejide revizyonlar yapılarak bir sonraki aşamaya geçilmektedir.

Orta Vadeli Pilot Uygulama ve Kademeli Geçiş (3-5 Yıl) aşama, fiilen elektrikli otobüslerin sahaya indirildiği ve küçük ölçekte test edilip ardından kademeli olarak yaygınlaştırıldığı dönemdir. Pilot uygulama, orta vadeli dönemin başında gelir. Planlama aşamasında belirlenen bir veya birkaç hat üzerinde sınırlı sayıda elektrikli otobüs ile pilot hizmet başlatılmaktadır. Pilot hat seçiminde, mümkünse kendine yeten bir koridor (örneğin yoğun bir ana hat veya turistik bir güzergâh) tercih edilir; böylece altyapı ve işletme koşulları kontrol altında tutulabilir. Pilot uygulamanın amacı, Antalya'nın iklimi, topografyası ve operasyonel koşulları altında elektrikli otobüs performansını değerlendirmektir. Bu süreçte test edilecek değişkenler arasında: batarya menzilinın gerçek koşullarda yeterliliği, şarj sürelerinin işletme programına etkisi, klima kullanımı gibi faktörlerin enerji tüketimine etkisi ve bakım ihtiyaçları sayılabilir. Pilot aşamada ortaya çıkabilecek aksaklıklar (ör. beklenenden uzun şarj süreleri, batarya ısınma problemleri vb.) kayıt altına alınır ve çözüm için ilgili paydaşlarla (üretici firma, teknik uzmanlar) birlikte çalışılır.

Pilot uygulamadan elde edilen veriler ışığında, kademeli geçiş planı detaylandırılmaktadır. Filonun tamamının bir anda dönüşmesi pratik olmadığından, her yıl belirli sayıda dizel otobüsün emekliye ayrılıp yerine elektrikli otobüs alınacağı bir takvim oluşturulmaktadır. Tipik olarak toplu taşıma filoları yılda yaklaşık %10 oranında yenilenebildiğinden, Antalya'da uygun finansman sağlandığı takdirde her yıl filonun %10-15'lik kısmının elektrikli araçlarla değiştirilmesi hedeflenebilir. Bu, yaklaşık 7-10 yıl içinde tüm filonun dönüşümü demektir. Yaygınlaştırma kademeli olarak şu şekilde yürütülebilir: İlk etapta şehir merkezindeki yoğun hatlar ve karbon emisyonu yüksek bölgeler önceliklendirilerek elektrikli otobüsler devreye alınmaktadır. Sonraki yıllarda coğrafi kapsam genişletilerek çevre ilçelere ve kırsal hatlara doğru dönüşüm yayılır. Her yeni otobüs alımı, mevcut plan dâhilinde ihale ve tedarik takvimine bağlanır; örneğin “Yıl 4'te 20 adet elektrikli otobüs alımı gerçekleştirilerek X deposuna tahsis edilecek” şeklinde somut adımlar planlanmaktadır.

Orta vadede altyapı genişletme yatırımları da eş zamanlı ilerler. Pilot aşamada kurulan sınırlı sayıdaki şarj istasyonuna ek olarak, filonun büyümesine paralel yeni şarj üniteleri devreye alınmaktadır. Şehrin farklı noktalarında (otobüs depoları, son duraklar, aktarma merkezleri gibi) yüksek güçlü şarj istasyonları inşa edilmektedir. Bu

aşamada, elektrik şebekesinin yükü artacağı için enerji tedarikçisi ile koordinasyon kritik önem taşır; gerekirse trafo merkezleri güçlendirilir, akıllı şarj yönetimi sistemleri kurulmaktadır (ör. gece yarısı düşük talep saatlerinde şarj etme gibi stratejiler uygulanır). Ayrıca bakım altyapısı da geliştirilir: elektrikli araçlar için uzmanlaşmış bir bakım atölyesi kurulması, yedek parça stokunun planlanması gibi adımlar atılmaktadır.

Kurumsal sorumluluklar orta vadede çok aktörlü bir yapıya yayılmaktadır. Belediye, genel koordinasyon ve izleme rolünü sürdürürken, ulaşım işletmecileri günlük operasyonları yürütmektedir. Pilot hat işletmesinde elde edilen deneyim, sürücülerin ve bakım ekiplerinin eğitimine yansıtılmakta; örneğin pilot aşamasında görev alan deneyimli sürücüler yeni gelen sürücülere mentorluk yapabilir. Özel sektör tedarikçileri, taahhüt ettikleri teknik desteği (ör. batarya garantileri, yazılım güncellemeleri) sağlamakla sorumludur. STK'lar ve vatandaşlar ise bu aşamada dış gözlemci olarak önem taşımaktadır; belediye, düzenli aralıklarla kamuoyu yoklamaları ve memnuniyet anketleri yaparak halkın deneyimini ölçer ve şikâyetleri değerlendirmektedir.

İzleme ve değerlendirme mekanizmaları orta vadede tam kapasite çalışmalıdır. Pilot uygulama süresince toplanan veriler raporlanır: Araç başına düşen ortalama enerji tüketimi, emisyon azalım oranları, bakım maliyetleri, arıza sıklıkları gibi performans göstergeleri izlenilmektedir. Bu veriler, dönüşümün finansal ve çevresel sürdürülebilirliğini doğrulamak için kullanılmaktadır. Örneğin, pilot hatta elektrikli otobüslerin dizel muadillerine kıyasla yılda kaç ton CO₂ azalımı sağladığı hesaplanarak hedeflerle kıyaslanmaktadır. Yıllık ilerleme raporları, yönlendirme kurulunda tüm paydaşlarla paylaşılır; böylece şeffaf bir değerlendirme ortamı oluşmaktadır. Eğer hedeflenen performanstan sapmalar varsa (örneğin planlanandan az sayıda otobüs alınabilmişse ya da beklenenden yüksek enerji maliyeti oluşmuşsa), nedenleri analiz edilerek stratejide gerekli düzeltmeler yapılmaktadır. Orta vadeli aşamanın sonunda – ki bu yaklaşık 5. yıl civarına denk gelir – belediye ve paydaşlar bir ara değerlendirme toplantısı yaparak projenin genel gidişatını gözden geçirmektedir. Bu değerlendirme, uzun vadeli tam uygulama aşamasına geçiş için gereken son düzeltmeleri ve hazırlıkları yapma fırsatı sunmaktadır.

Uzun Vadeli Yaygınlaştırma ve Tam Geçiş (5+ Yıl) aşamada, elektrikli otobüs teknolojisi Antalya'nın toplu taşıma sistemine tam entegrasyon kazanmaktadır. Bu dönem, filonun geri kalanının elektrikliye dönüşümü, sistem optimizasyonları ve projenin sürekli hale getirilmesini içermektedir. Hedeflenen yıl itibariyle (örneğin 8. veya 10. yıl), tüm dizel otobüslerin hizmetten çekilerek yerlerini elektrikli otobüslere bırakması planlanmaktadır. Bu noktada Antalya'nın toplu taşıma filosu %100 düşük karbonlu hale gelmiş olacaktır. Sorumlu kurumlar, dönüşüm tamamlanmış olsa da görevlerine devam eder: Belediye, yeni sistemin işletimini denetler ve gerektiğinde politika güncellemeleri yapar; ulaşım operatörleri günlük hizmetin aksamadan sürmesini sağlar; enerji şirketi artan elektrik talebini yönetir ve mümkünse yenilenebilir enerji oranını yükseltir (örneğin otobüs depolarına güneş panelleri kurularak şarj için kullanılan elektriğin bir kısmının yerinde üretilmesi). Uzun vadede özel sektör ile ilişkiler, daha çok bakım ve teknolojik yenileme ekseninde devam eder: bataryaların ömürleri takip edilir, yenileme gerektiğinde üretici ile koordineli şekilde değişimler yapılır; yeni ortaya çıkan daha verimli şarj teknolojileri veya araç modelleri varsa filoya entegre edilmektedir. Bu aşamada kaynak ihtiyacı, ilk yatırım dönemine kıyasla azalır ancak tamamen ortadan kalkmaz. Elektrikli filonun sürdürülebilir çalışması için işletme ve bakım bütçesi ayrılmaya devam edilir. Dizel yakıt alım giderlerinin önemli ölçüde düşmesiyle, buradan tasarruf edilen kaynaklar elektrik masraflarına ve batarya yenilemelerine yönlendirilebilir. Ayrıca, uzun vadede karbon emisyonu azaltım performansı sayesinde ulusal/uluslararası karbon kredileri veya çevre fonlarından ek gelir sağlanması mümkün olmaktadır. Tam geçişin sağlanmasıyla birlikte, belediye filo yönetiminde optimizasyon çalışmalarına yönelebilir: Örneğin, güzergâhların yeniden düzenlenmesi, otobüs ağının verimliliğinin artırılması bu aşamada ele alınabilir. Elektrikli otobüslerin sessiz ve temiz olma avantajı kullanılarak, daha önce gürültü veya kirlilik nedeniyle uygun görülmeyen bölgelerden hat geçirilmesi mümkün hale gelebilir. Dolayısıyla uzun vadede proje sadece araç dönüşümüyle sınırlı kalmaz, kentsel ulaşım politikasında daha geniş dönüşümlerin de tetikleyicisi olur.

İzleme ve sürekli iyileştirme, tam geçişten sonra da devam eden bir süreçtir. Elektrikli otobüs filosunun performansı gerçek zamanlı izleme sistemleri ile takip edilir. Belediyenin kontrol merkezinde, her bir otobüsün enerji tüketimi, sefer performansı, doluluk oranları gibi veriler toplanarak büyük veri analizi yapılabilir. Bu veriler,

hizmet kalitesini artırmak için kullanılmaktadır (örneğin sık geciken hatlar tespit edilip şarj planları revize edilir, düşük doluluk oranına sahip seferlerde araç planlaması optimize edilir). Ayrıca projenin çevresel etkileri yıllık olarak raporlanır: Toplu taşıma kaynaklı emisyonlarda sağlanan toplam azalma, hava kalitesindeki iyileşme, gürültü kirliliğindeki azalma gibi göstergeler bilimsel yöntemlerle ölçülerek kamuoyuyla paylaşılır. Uzun vadede, bağımsız denetim ve sertifikasyon mekanizmaları da devreye sokulabilir; örneğin Antalya, elektrikli ulaşım konusunda bir “yeşil şehir” sertifikasyonu hedefliyorsa, proje çıktıları uluslararası denetçilerce incelenmekte ve doğrulanmaktadır.

Kurumsal olarak, dönüşüm projesinin kalıcı başarısı için, proje başlangıcında kurulan paydaş koordinasyon yapıları devam ettirilir. Elektrikli otobüsler günlük hayatın parçası haline gelmiş olsa da, teknolojik yenilikler ve büyüyen şehir yapısı yeni sınamalar getirebilir. Bu nedenle, paydaşlar arası iletişim platformu (örneğin yılda bir toplanan Ulaşım Danışma Kurulu) sürdürülerek, hem geri besleme almaya hem de yeni öneriler geliştirmeye devam edilir. Halkın memnuniyeti uzun vadede en önemli ölçütlerden biridir; dolayısıyla periyodik kullanıcı memnuniyeti anketleri uygulanır, talep ve şikâyetler değerlendirilir. Elde edilen başarıların sürdürülebilmesi, projenin dinamik bir şekilde yönetilmesine ve gerektiğinde yeni politikalara adaptasyonuna bağlıdır. Örneğin, 10 yıl sonrasında elektrikli otobüs teknolojisinde devrimsel bir yenilik (daha yüksek kapasiteli bataryalar, otonom sürüş vb.) çıkarsa, Antalya bu yenilikleri benimsemek için stratejisini güncelleyebilmelidir.

KAYNAKLAR

- AC Transit, 2020. Zero-Emissions Bus Rollout Plan, Version 1 Alameda-Contra Costa Transit District. Oakland, CA. http://www.actransit.org/wp-content/uploads/AC-Transit-ZEB-Rollout-Plan_06102020.pdf. Erişim Tarihi: 10.05.2025.
- Akarsu, F., 2022. Küçükköy çevre dostu ulaşım sistemleri strateji ve yol haritası. Sürdürülebilir Enerji Temelli Turizm Uygulama Merkezi.
- Akbulut, F., 2016. Kentsel ulaşım hizmetlerinin planlanması ve yönetiminde sürdürülebilir politika önerileri. Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 11(1), 336-355.
- Akkaya, A., 2023. Sürdürülebilir kentleşme modellerinin üretilmesinde dirençli kent inşaatı (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya.
- Alp, G., 2022. İstanbul'da raylı sistem yatırımlarının kentin gelişimi ve arazi kullanımı üzerindeki etkileri: Arnavutköy ilçesi örneği (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Alpay, B. U., 2023. Kentsel mekân ve pandemi sürecinde değişen hareketlilik: İstanbul-Büyükdada örneği ile bir değerlendirme. Kent Akademisi, 16(3), 1759-1780.
- Altunsoy, Ü., 2021. Kargo taşımacılık sisteminde elektrikli araçlar kullanımı üzerine inceleme. International Anatolia Academic Online Journal Sciences Journal, 7(2), 1-14.
- Altuntaş, S., ve Eyigün, Y., 2021. Sürdürülebilir kent içi ulaşım politikaları: Raylı sistemler örneği. İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi, 3(2), 217-233.
- Altuntaş, T., Sertbaş, K., Gönener, U., Uzuner, M. E., Gönener, A., ve Bahadır, T. K., 2020. Yerel yönetimlerde fiziksel hareketin sürdürülebilirliğini destekleyen KOBİS (Kocaeli Bisikletli Ulaşım Sistemi) projesinin yönetim ve uygulama süreçlerinin incelenmesi. Sinop Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 4(1), 277-296.
- Antalya Ulaşım, 2025. <https://www.antalyaulasim.com.tr/Hizmetlerimiz/Antray>. Erişim Tarihi: 10.05.2025.
- Antalya Büyükşehir Belediyesi, 2022a. Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planı. <https://www.antalya.bel.tr/Content/UserFiles/Files/YarinlardaBizVariz/Dokumanlar/2022/SECAP-SURDURULEBILIR-ENERJİ-VE-İKLİM-EYLEM-PLANI-2022.pdf>. Erişim Tarihi: 10.05.2025.

- Antalya Büyükşehir Belediyesi, 2022b. Büyükşehir'in Araç Filosuna Elektrikli Otobüs. <https://antalya.bel.tr/Haberler/HaberDetay/4748/buyuksehirin-arac-filosuna-elektrikli-otobus>. Erişim Tarihi: 10.05.2025.
- Antalya Büyükşehir Belediyesi, 2025a. 2025 Performans Programı. https://www.antalya.bel.tr/Content/UserFiles/Files/Raporlar/ABB_2025_YIL_I_PERFORMANS_PROGRAMI.pdf. Erişim Tarihi: 10.05.2025.
- Antalya Büyükşehir Belediyesi, 2025b. Antalya Büyükşehir Belediyesi İlçeler Toplu Taşıma Araçları Çalışma Usul ve Esaslarına dair Yönetmelik Taslağı. https://antalya.bel.tr/Content/UserFiles/Files/Birimler_Mevzuatlar_Yeni%2FR.00-İlçeler%20Toplu%20Taşıma%20Araçları%20Yön..pdf. Erişim Tarihi: 10.05.2025.
- Antalya Büyükşehir Belediyesi, 2025c. Sera Gazı Azaltımı ve İklim Değişikliğine Uyum. <https://www.antalya.bel.tr/YarınlardaBizVariz/Iklim-Degisikligine-Uyum>. Erişim Tarihi: 10.05.2025.
- Antalya Tabip Odası, 2025. https://www.ttb.org.tr/eweb/data/kisa_haber/ocak05/antalya_hava.php. Erişim Tarihi: 10.05.2025.
- Arkun, A. K., 2020. Türkiye'de sürdürülebilir kentsel tasarım modeli ve değerlendirme sistemi geliştirmek. Şehir ve Medeniyet, 6(12), 109-134.
- Arslan, O., 2010. Kaliteli bir toplu taşıma sistemi nasıl olmalıdır? Münih örneği. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi 9. Ulaştırma Kongresi, 16-18.
- Ayaz, Ç. E., 2023. Kentsel hareketlilik yönetimine stratejik bir bakış: İstanbul sürdürülebilir kentsel hareketlilik planı üzerine nitel bir analiz. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 24(1), 41-55.
- Aybirdi, C. B., 2021. Elektrikli araç şarj istasyonu lokasyonlarının çok ölçütlü karar verme teknikleri ile seçilmesi: Ankara'da vaka çalışması (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara.
- Aylan, F. K., 2021. Bisiklet turizmi bağlamında bisiklet dostu şehir uygulamalarına yönelik bir araştırma: Twitter örneği. Türk Turizm Araştırmaları Dergisi, 5(2), 1388-1403.
- Aliustaoğlu, S., 2019. Bir dizel motorunda lpg-dizel çift yakıt karışımları+ egr'nin performans ve emisyon karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi (Master's thesis, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi).
- Bacaksız, N. E., 2019. Türkiye'de kamu ulaşırma yatırımlarının verimliliğini etkileyen faktörlerin analizi (Yüksek lisans tezi). Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Muğla.

- Bağdatlı, M. E., 2016. Karayolu projelerinin fayda-maliyet analizleri için risk eklentili yeni bir bulanık bilişsel harita modeli (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Barut, H. B., 2012. Türkiye’de kent içi toplu taşıma sistemlerinde hizmet düzeyinin belirlenmesi için bir yöntem geliştirilmesi (Doktora tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Bayraktar, F., 2020. Enerji verimli sürdürülebilir akıllı ulaşım planlaması ve uygulamalarının değerlendirilmesi: Kayseri kent içi ulaşımı (Yüksek lisans tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Benk, S., ve Akdemir, T., 2010. Toplu taşıma hizmetlerinde fiyatlandırma stratejileri: Teorik bir değerlendirme. *Ekonomi Bilimleri Dergisi*, 2(1), 131-138.
- Bilgin, E., 2024. Robin Hahnel’in bakış açısından fayda maliyet analizi. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, (69), 17-26.
- Bulut, A., ve Adıgüzel, Ş., 2023. Akıllı kent yaklaşımı ve büyükşehir belediyelerinde uygulama imkanları: Gaziantep ve Hatay büyükşehir belediyeleri örnekleri. *Uluslararası Akademik Birikim Dergisi*, 6(2).
- Candan, D. E., ve Gülpınar, T., 2023. Çevreci yolculuklar için demiryolu ve tren ilişkisinin anatomisi. *Memleket: Politics ve Administration/Siyaset Yönetim*, 18(40).
- Ceylan, S., 2019. Kentsel sürdürülebilirliği sağlamada geri planda kalan bir boyut: Toplumsal dayanışma ve bütünleşme kültürü (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Cirit, F., 2014. Sürdürülebilir kentiçi ulaşım politikaları ve toplu taşıma sistemlerinin karşılaştırılması (Uzmanlık tezi). TC Kalkınma Bakanlığı, Ankara.
- Civelekoğlu, G., ve Bıyık, Y., 2018. Ulaşım sektöründen kaynaklı karbon ayak izi değişiminin incelenmesi. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 2(2), 157-166.
- Cengiz, Y., 2021. Elektrikli araçlara yönelik kamusal teşvikler ve beklentiler: İstanbul saha çalışması= Public incentives and expectations for electric vehicles: Istanbul field study.
- Çelik, T., 2022. İklim değişikliği ve enerji sektörü. *İklim Değişikliğinin Ekonomik Etkileri* (s. 137-169). Konya: Necmettin Erbakan Üniversitesi Yayınevi.
- Çıtak, M., 2014. Bir dizel motorunda MTBE katkılı biyodizel kullanımının deneysel analizi (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Demirkol, M. O., 2024. Ordu ilinde elektrikli ve hibrit araçların içten yanmalı motorlu araçlara göre çevreye etkisi (Yüksek lisans tezi). Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu.
- Demirkol, Ö. F., 2019. Akıllı şebeke teknolojilerinin incelenmesi ve Türkiye açısından durum analizi (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Devlet Havayolları Müdürlüğü, 2025. <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/Haber/antalya-havalimaninin-kapasitesi-82-milyona-cikiyor.aspx>. Erişim Tarihi: 10.05.2025.
- Dilek, E., Talih, Ö., ve Ceylan, H., 2023. Ulusal akıllı ulaşım sistemleri mimarisinin yaygınlaştırılması: Türkiye önerisi. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 6(2), 353-392.
- Dündar, A. O., ve Kolay, A., 2021. Karayolu yük ve yolcu taşımacılığının çevresel sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmesi ve Konya ili sera gazı emisyonunun hesaplanması. Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 14(1), 317-334.
- Ekşioğlu, Ş. Z., 2012. Kültürel sermaye ve ekonomik kalkınma arasındaki ilişkinin girdi çıktı analizi ve fayda maliyet analizi yöntemleri ile Türkiye için değerlendirilmesi (Yayımlanmamış doktora tezi). Kadir Has Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Ece Çokmutlu, M., ve Özen, S., 2023. The relationship of carbon emissions and risk of default in Borsa İstanbul companies. Hitit Journal of Social Sciences, 16(1), 152-170.
- Erdir, A., 2013. Kentsel lojistik İzmir ili için bir uygulama (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Erdoğan, S., 2018. İklim değişikliğine karşı verilen küresel mücadele ve Avrupa Birliği. Manas Sosyal Araştırmalar Dergisi, 7(4).
- Erkan, V. 2008. İklim değişikliğinin yerleşik düzen, kentsel yapı üzerindeki etkileri ve çözüm önerileri (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ersoy, Ç. M., 2019. Çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında dünyada ve Türkiye'de akıllı kent uygulamaları (Yüksek lisans tezi). Kocaeli Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kocaeli.
- Eryiğit, S., 2020. Sürdürülebilir ulaşımın sosyal boyutunda bisikletin yeri (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Fidan, A. N., Karadeniz, A., ve Gelişen, G., 2022. Sürdürülebilir akıllı ulaşım sistemleri yönetimi: Bursa şehri incelemesi. 2nd International Congress of Engineering and Natural Sciences Studies (ICENSS-2022) (s. 26-49).

- Gülümser, A. T., 2022. Raylı sistem fizibilite çalışmalarında sosyal ve çevresel fayda bileşenlerinin analiz edilmesi (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Güldüler, E. S., 2022. Kent içi toplu ulaşımın operasyon ve bakım uygulamalarında yeni model arayışları. IDEALKENT, 13(36), 771-796.
- Güner, C., 2013. Dışarıdan şarj edilebilen hibrit elektrikli araç ile menzil artırıcı elektrikli araç konseptlerinin karşılaştırmalı analizi (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Güröl, B., 2019. Sürdürülebilir üretim göstergelerinin kurumsal sürdürülebilirlik performansına etkisinin araştırılması (Doktora tezi). İstanbul Gelişim Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Fural, M., 2019. Antalya Büyükşehir Belediyesinde Akıllı Kent Uygulamaları (Master's thesis, Kırşehir Ahi Evran University (Turkey)).
- Hamurcu, A. U., 2023. Akıllı Şehirler ve Sürdürülebilir Kentsel Dönüşüm. Çevre Şehir ve İklim Dergisi, 2(4), 70-95.
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2025. <https://finansman.ibb.istanbul/580-milyon-abd-dolari-tutarinda-eurobond-ihrac-ettik/>. Erişim Tarihi: 10.05.2025.
- İşler, I. 2018., Kamu kaynaklarının etkin kullanımında fayda-maliyet analizinin uygulanmasına bir örnek: Denizli havalimanı projesi (Doktora tezi). Pamukkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Denizli.
- İşıldaklı, B., 2022. Kentsel ve çevresel sürdürülebilirlik açısından Türkiye'de atık suyun geri kazanımı ve yeniden kullanılabilirliği (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- İçli, G. 2017., Yavaşlayan kentler ve yaşlılar. Yaşlı Sorunları Araştırma Dergisi, 10(2), 67-75.
- İlhan, A., ve Göktuğ, T. H., 2020. 21. yüzyılda Çin'in sürdürülebilirlik paradigması: Ekolojik medeniyet. Journal of the Institute of Science and Technology, 10(3), 2047-2061.
- Kahraman, S., 2018. İklim değişikliğinin bölgesel ve kentsel alanlar üzerinde etki analizi: TR61 (Antalya, Isparta, Burdur) bölge örneği (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kalpakçı, A., 2013. Ara toplu taşıma sistemlerinin şehir içi otobüs sistemleri ile entegrasyonu: İzmir ili örneği (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Karadağ, F., 2008. Sürdürülebilir kalkınma çerçevesinde Türkiye'de enerji sektörü ve politikaları (Yüksek Lisans Tezi). Gaziantep Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Gaziantep.

- Karlı, R. G. Ö., 2023. Akıllı kentsel hareketlilik bağlamında paylaşımlı mikromobiliteye yönelik mod değiştirme potansiyelinin analizi (Doktora tezi). Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- Kaya, Y., 2018. İklim değişikliğine karşı kentsel kırılganlık: İstanbul için bir değerlendirme. *International Journal of Social Inquiry*, 11(2), 219-257.
- Kara Yolları Genel Müdürlüğü, 2025. <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/TrafikveUlasimBilgileri/24TrafikUlasimBilgileri.pdf>. Erişim Tarihi: 10.05.2025.
- Kenanoğlu, M. E., ve Aydın, M., 2018. Akıllı ulaşım sistemlerinin dışsallık bağlamında değerlendirilmesi: Seçilmiş ülke uygulamaları. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, 3(2), 363-387.
- Koç, B., 2019. Demiryolu ulaşımının şehir ekonomisine muhtemel etkileri: Aksaray ili örneği (Yüksek lisans tezi). Aksaray Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Aksaray.
- Korkmazyürek, B., ve Polat, E., 2019. Kentsel ulaşımında esnek, akıllı ve yeni bir planlama yaklaşımı: Sürdürülebilir kentsel hareketlilik planları. *Kent Akademisi*, 12(2), 225-240.
- Köse, H. Ö., 2023. Sürdürülebilir kalkınma amaçlarının gerçekleştirilmesinde Birleşmiş Milletler ve INTOSAI iş birliği. *Sayıştay Dergisi*, 34(130), 497-505.
- Kuleyin, Y., 2011. Yat limanı işletmelerinde fayda-maliyet analizi: Ege bölgesinde bir yat limanında uygulama (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Kuşat, N., 2013. Yeşil sürdürülebilirlik için yeşil ekonomi: Avantaj ve dezavantajları – Türkiye incelemesi. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 8(29), 4896-4916.
- Kuter, N., ve Ünal, H. E., 2009. Sürdürülebilirlik kapsamında ekoturizmin çevresel, ekonomik ve sosyo-kültürel etkileri. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 9(2), 146-156.
- Meşhur, H. F. A., 2019. Akıllı şehir çözümlerinin sunduğu olanaklar ve İstanbul'daki uygulamalara ilişkin bir değerlendirme. İstanbul'da Büyük Ölçekli Kentsel Projeler ve Planlama Süreçleri, 1.
- Murteza, M., 2010. Raylı sistem yatırımları fizibilite etüdleri ve yapım yöntemleri (Doktora tezi). Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Nalbant, M. K., 2019. Hidrojen ekonomisinin otomotiv sektöründe önemi: Türkiye örneği (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). 2021. Guidebook for Deploying Zero-Emission Transit Buses. Washington, DC: The National Academies Press.
- Öncü, E., 2007. Kent içi ulaşımında karar süreçleri ve karar ölçütleri. Ulaştırma Kongresi Bildiri Kitabı, 65-82.
- Örselli, E., ve Akbay, C., 2019. Teknoloji ve kent yaşamında dönüşüm: Akıllı kentler. Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi, 2(1), 228-241.
- Örselli, E., ve Dinçer, S., 2019. Akıllı kentleri anlamak: Konya ve Barcelona üzerinden bir değerlendirme. Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi, 2(1), 90-110.
- Özdemir, U., 2019. Akıllı şehir uygulamalarının karşılaştırmalı analizi (Yüksek lisans tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Özdemir, Ö. N., 2022. Yenilikçi tüketici davranışları: Türkiye ve Almanya'da elektrikli araçların kabulü üzerine karşılaştırmalı bir araştırma (Doktora tezi). Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Öztaşçı, D. D., Ünalın, G., ve Ersoy, U., 2021. Başkent Üniversitesi ile koru metrosu arasında bisiklet paylaşım sistemi kurulmasının fayda-maliyet analizi. Maliye Çalışmaları Dergisi, (66), 107-137.
- Öztopcu, A., ve Salman, A., 2019. Sürdürülebilir kalkınmada akıllı kentler. Karadeniz Uluslararası Bilimsel Dergi, (41), 167-188.
- Pınarcıoğlu, N. Ş., ve Kanbak, A., 2020. Sürdürülebilir kent modelleri. IJOPEC Publications.
- Recepoğlu, S. B., 2021. Kocaeli ilindeki dizel ve doğal gaz yakıtlı otobüs ve minibüslerin emisyon envanteri (Yüksek lisans tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Sarıçoban, K., 2011. Türkiye'de uygulanan çevre politikalarının sürdürülebilir kalkınma üzerine etkileri (Doktora tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Isparta.
- Sencar, P., 2007. Türkiye'de çevre koruma ve ekonomik büyüme ilişkisi (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Trakya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Edirne.
- Şişman, V., 2015. Toplu taşımacılıkta verimlilik yönetimi: İETT hatlarının diğer toplu taşıma türleriyle entegrasyonu üzerine bir araştırma (Yüksek lisans tezi). Nişantaşı Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Tanoğlu, S., 2014. Şehir içi karayolunun etkin ve verimli kullanılmasına yönelik bir araştırma (Doktora tezi). Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Tarhan, A. K., ve Ercoşkun, O., 2023. İstanbul park et devam et sisteminin sürdürülebilir ve entegre ulaşım etkisi. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 6(2), 446-465.
- Tektanıl, M., 2008. Toplu taşımadaki doğalgazlı otobüslerin karbondioksit emisyonlarına etkileri (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tezcan, S.S., Ergün, G., 2005. Antalya için Ulaşım Alt Yapısı Önerileri, CV-336. Bildiriler Kitabı (Editör Ali Koçak), Antalya Yöresinin İnşaat Sorunları Kongresi, 22-24 Eylül 2005, Cilt 2, s. 439-452, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Antalya Şubesi, Antalya.
- Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası., 2025. <https://www.tcmb.gov.tr> Döviz Kurları. Erişim tarihi: 25.04.2025
- Tilkioğlu, B., 2019. Akıllı kent bileşenlerinin akıllı kentleşme anlayışı açısından değerlendirilmesi: İstanbul Kadıköy Belediyesi örneği (Yüksek Lisans Tezi). Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale.
- Tonk, E. C., ve Selçuk, S. A., 2020. Cittaslow unvanı alan kentlerin sürdürülebilir ulaşım bağlamında incelenmesi ve Ankara-Güdül ilçesi için öneriler. Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural ve Medical Sciences, 7(8), 188-201.
- Töre, E., ve Çağlayan, Ö., 2018. Bir katılım aracı olarak kentsel tasarım: Medellin mucizesi. Turkish Online Journal of Design Art and Communication, 8(1), 19-36.
- Tufan, H., 2014. Akıllı ulaşım sistemleri uygulamaları ve Türkiye için bir AUS mimarisi önerisi (Ulaştırma ve Haberleşme Uzmanlığı Tezi). TC Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara.
- Turan, M., 2007. Fayda-maliyet analizi kapsamında Kızılcahamam Soğuksu Milli Parkı incelemesi (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Tutan, A., 2016. Kent içi raylı sistemlerde müşteri memnuniyetinin tespiti: İstanbul metrolarını kullanan yolcular üzerinde bir uygulama (Yüksek lisans tezi). İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Türkkan, A. Z., 2019. Yapay zeka ve kentsel sistemler: Akıllı ulaşım sistemlerinin kentsel güç içindeki rolü (Yüksek lisans tezi). Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ulaştırma Yönetimi ve Kentsel Sistemler Programı, İstanbul.
- Ulusoy, M., 2017. Akıllı şehirler (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). İstanbul Bilgi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

- Yavuz, H. R., 2024. Akıllı şehirlerde ulaşım özelinde İstanbul örneği. Premium e-Journal of Social Sciences (PEJOSS), 8(38), 91-96.
- Yazar, K. H., 2006. Sürdürülebilir kentsel gelişme çerçevesinde orta ölçekli kentlere dönük kent planlama önerisi (Doktora Tezi). Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Yeniçeri, B., 2017. Kentsel dönüşüm ve kentsel yenileme süreçlerinin ulaşım planı kapsamında değerlendirilmesi ve etkilerinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi, İstanbul.
- Yılmaz, A., 2012. Türkiye’de sektörel enerji tüketimini etkileyen faktörler ve alternatif enerji politikalar (Yüksek lisans tezi). Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Aydın.
- Yücel, N., 2019. İstanbul’da yapılması planlanan raylı sistem projelerinin çok kriterli karar verme yöntemi ile seçimi. Master's thesis, Mimar Sinan Fine Arts University (Turkey).
- TÜİK, 2024. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayal%C4%B1-N%C3%BCfus-Kay%C4%B1t-Sistemi-Sonu%C3%A7lar%C4%B1-2024-53783&dil=1>. Erişim Tarihi: 10.05.2025.
- Ulaştırma Bakanlığı, 2025. <https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/stratejik-yonetim/2024-yili-uab-faaliyet-raporu.pdf>. Erişim Tarihi: 10.05.2025.