

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İKTİSAT ANABİLİM DALI
İKTİSADİ GELİŞME VE ULUSLARARASI İKTİSAT PROGRAMI**

**YENİLENEBİLİR ENERJİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİR
KALKINMA ÜZERİNE OLAN ETKİSİ ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN
SWOT ANALİZİ ÇERÇEVESİNDE İNCELENMESİ**

Melih ÜNAL

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Hayriye BAŞCI NUR**

MANİSA-2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İktisat Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zekâ ve program kullanmadığımı beyan ederim.

İmza

Melih ÜNAL



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Melih ÜNAL
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İktisat Anabilim Dalı

Danışman:
Dr. Öğr. Üyesi Hayriye BAŞCI NUR

Bu çalışma, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma arasındaki ilişkiyi derinlemesine inceleyerek, özellikle elektrikli araçlar örneği üzerinden somut bir değerlendirme yapmayı amaçlamaktadır. Günümüzde artan enerji talebi ve fosil yakıtların çevresel etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmıştır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları, düşük karbon salınımı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik rol oynamaktadır. Sürdürülebilir kalkınma, ekonomik büyüme, çevresel koruma ve toplumsal refahı dengeleyen bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Elektrikli araçlar, fosil yakıt tüketimini azaltarak sürdürülebilir ulaşım çözümleri sunarken, bu dönüşüm süreci altyapı, batarya geri dönüşümü ve teşvik mekanizmaları gibi çok yönlü gereksinimleri beraberinde getirmektedir.

Tez kapsamında, yenilenebilir enerji politikalarının ekonomik, sosyal ve çevresel etkileri analiz edilerek, farklı ülkelerin enerji stratejileri karşılaştırılmıştır. Elektrikli araçların sektörel değerlendirmesi SWOT analizi ile ele alınarak güçlü ve zayıf yönleri, fırsatlar ve tehditler sistematik bir şekilde ortaya konulmuştur. Araştırmada, literatür taraması ve uluslararası kuruluşlardan elde edilen istatistikler ışığında, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma arasındaki etkileşimin kapsamlı bir çerçevesi sunulmuştur. Sonuç olarak, enerji dönüşüm sürecinde karşılaşılan zorluklar ve fırsatlar değerlendirilmiş, politika yapıcılara ve yatırımcılara yönelik stratejik öneriler geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, Sürdürülebilir Kalkınma, Yenilenebilir Enerji, Swot Analizi, Enerji

2025, 144 sayfa

ABSTRACT

M.SC. Thesis

Melih ÜNAL

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Education
Department of Economics**

Supervisor:

Dr. Öğr. Üyesi Hayriye BAŞCI NUR

This study aims to comprehensively examine the relationship between renewable energy and sustainable development, specifically through the example of electric vehicles. The increasing global energy demand and the environmental impacts of fossil fuels have heightened the importance of renewable energy sources. Renewable energy sources such as solar, wind, hydroelectric, geothermal, and biomass play a critical role in reducing carbon emissions and ensuring environmental sustainability. Sustainable development stands out as an approach that balances economic growth, environmental protection, and social well-being. Electric vehicles offer sustainable transportation solutions by reducing fossil fuel consumption. However, this transition process brings along various requirements, including infrastructure development, battery recycling, and incentive mechanisms.

Within the scope of this thesis, the economic, social, and environmental impacts of renewable energy policies have been analyzed, and the energy strategies of different countries have been compared. The sectoral evaluation of electric vehicles has been systematically conducted using a SWOT analysis, identifying strengths, weaknesses, opportunities, and threats. Through a literature review and statistical data obtained from international organizations, this research provides a comprehensive framework for understanding the interaction between renewable energy and sustainable development. As a result, challenges and opportunities in the energy transition process have been assessed, and strategic recommendations have been developed for policymakers and investors.

Keywords: Electric Vehicles, Sustainable Development, Renewable Energy, Swot Analysis, Energy

2025, 144 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışma “Yenilenebilir Enerjinin Sürdürülebilir Kalkınma Üzerine Olan Etkisi Elektrikli Araçların Swot Analizi Çerçevesinde İncelenmesi” başlığı altında, elektrikli araçların yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma ile olan derin bağlarını incelemektedir. Çalışma bu bağın kavrayarak, sürdürülebilirlik ve çevresellik açısından nasıl bir yol izlememiz gerektiğini anlamamızı amaçlamaktadır.

Bu çalışma üç ana başlık çerçevesinde açıklanmaya çalışılmıştır. İlk bölüm yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma kavramlarının kuramsal çerçevesi ve tanımının yapıldığı bölümdür. Burada kavramlar derinlemesine incelenerek anlaşılabilmesi amaçlanmıştır. İkinci bölüm, bu iki kavramın arasındaki ilişkinin anlatıldığı ve bağlarının açıklandığı bölümdür. Üçüncü ve son bölümde elektrikli araçlar swot analizi yöntemi ile incelenmiştir. Burada güçlü ve zayıf yönleri ile tehdit unsuru ve fırsat yaratan noktaları anlatılmaktadır.

Tez yazım sürecimde bilgi ve birikimleri ile bana her zaman yol gösteren saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Hayriye Başçı Nur’a, desteklerini her zaman hissettiğimiz sevgili İ.İ.B.F. hocalarıma teşekkürlerimi borç bilirim.

Bu süreçte her türlü nazımı çekerek beni destekleyen sevgili annem Cemile Ünal’a, kıymetli babam Muzaffer Ünal’a, ve ağabeyim Oğuz Kaan Ünal’a derin sevgi ve saygılarımı sunarım.

Lisansüstü eğitimim boyunca beni hem maddi hem manevi olarak destekleyen sevgili eşim Elifnur Kalfa Ünal’a ve bu süreçte dünyaya gelen biricik oğlumuz Fatih Alp Ünal’a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Melih ÜNAL

Manisa,2025

KISALTMALAR DİZİNİ

ACEA	European Automobile Manufacturers' Association (Avrupa Otomobil Üreticiler Birliği)
AR-GE	Araştırma Geliştirme
BEV	Tam Elektrikli Araç (Battery Electric Vehicle)
DOE	Enerji Departmanı (Department of Energy)
EA	Elektrikli Araçlar
HEV	Hibrit Elektrikli Araçlar (Hybrid Electric Vehicle)
IYMA	İçten Yanmalı Motorlu Araçlar
PHEV	Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar (Plug-In-Hybrid)
PM	Partikül Madde
SDG	Sustainable Development Goals (Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri)
TCO	Toplam Sahip Olma Maliyeti (Total Cost of Ownership)
USD	Amerikan Doları
YEKA	Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları
V2G	Vehicle to Grid (Araçtan Şebekeye)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 1: Kuyudan Tekere (well to wheel) Şeması	51
Resim 2: Elektrikli ve İçten Yanmalı Araçların Yürüyen Aksamı	55
Resim 3: Vehicle to Grid (V2G) Şeması	61
Resim 4: Elektrikli Araçların Batarya Maliyetlerinin Toplam Maliyetlerine Oranı	63
Resim 5: Akıllı Şebeke (Smart Grid) ve Araçtan Şebekeye (V2G) Entegrasyonu	100

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1: Yenilenebilir Enerji Türleri, Tanımı ve Avantajları	Sayfa
Tablo 2: Swot Analizi Akış Tablosu	10
	49

GRAFİK DİZİNİ

Grafik 1: Elektrikli Araçların Yıllara Göre Sunduğu Ortalama Menzilleri	Sayfa
	85

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	III
KISALTMALAR DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ	V
TABLolar DİZİNİ	VI
GRAFİK DİZİNİ	VI
İÇİNDEKİLER	VII
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

YENİLENEBİLİR ENERJİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA KAVRAMLARININ TANIMI VE KURAMSAL ÇERÇEVESİ

1.1. Enerji İhtiyacı ve Küresel Sorunlar	6
1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları	8
1.2.1. Güneş Enerjisi	11
1.2.2. Rüzgâr Enerjisi	11
1.2.3. Hidroelektrik Enerji	11
1.2.4. Jeotermal Enerji	11
1.2.5. Biyokütle Enerjisi	12
1.3. Yenilenebilir Enerji Politikaları ve Gelecek Perspektifleri	12
1.3.1. Avrupa Birliği	12
1.3.2. Amerika Birleşik Devletleri	13
1.3.3. Çin	14
1.3.4. Türkiye	15

1.4. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımının Önemi	15
1.5. Sürdürülebilir Kalkınma Nedir?	18
1.6. Sürdürülebilir Kalkınmanın Tarihçesi	21
1.7. Sürdürülebilir Kalkınmanın Hedefleri	23
1.8. Sürdürülebilir Kalkınmanın Geleceği	24

İKİNCİ BÖLÜM

YENİLENEBİLİR ENERJİ İLE SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA ARASINDAKİ İLİŞKİ

2.1. Ekonomik Etkiler	26
2.1.1. Yatırım Maliyetleri ve Finansman	26
2.1.2. İstihdam Yaratma Potansiyeli	27
2.1.3. Enerji Arz Güvenliği ve Dışa Bağımlılığın Azaltılması	28
2.1.4. Yerli Üretim Kapasitesi ve Rekabet Gücü	28
2.2. Sosyal Etkiler	29
2.2.1. Enerjiye Erişim ve Kırsal Kalkınma	29
2.2.2. Toplumsal Katılım ve Paydaş Yönetimi	29
2.2.3. Toplumsal Eşitlik ve Kapsayıcılık	30
2.3. Çevresel Etkiler	30
2.3.1. Karbon Emisyonlarının Azaltılması	30
2.3.2. Doğal Kaynakların Korunması ve Kirliliğin Azaltılması	31
2.3.3. Biyoçeşitlilik ve Ekosistem Hizmetleri	31
2.4. Mevcut Politika ve Uygulamalar	32
2.4.1. Uluslararası Mevcut Çerçeveler	32
2.4.2. Türkiye'deki Mevcut Politikalar ve Stratejiler	33
2.5. Karşılaşılan Zorluklar	33
2.5.1. Teknolojik Sınırlamalar ve Enerji Depolama	34
2.5.2. Finansman ve Yatırım Riski	34
2.5.3. Kurumsal ve Yasal Engeller	34

2.5.4. Toplumsal Direnç ve Farkındalık Eksikliği	34
2.5.5. Çevresel Kaygılar ve Doğa Koruma	35
2.6. Geleceğe Yönelik Öngörüler ve Stratejik Yaklaşımlar	35
2.7. Yenilenebilir enerjinin Sürdürülebilir Kalkınmaya Etkisine	
Bir Örnek: Elektrikli Araçlar	37
2.7.1 Elektrikli Araçların Tanımı ve Tarihsel Gelişimi	38
2.7.2. Elektrikli Araç Çeşitleri ve Teknolojik Bileşenler	38
2.7.3. Elektrikli Araç Pazarının Mevcut Durumu	39
2.7.4 Elektrikli Araçların Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ile	
İlişkisi	40
2.7.5. Sürdürülebilir Ulaşım Politikaları ve Elektrikli Araçlar	41
2.8. Swot Analizi Nedir?	41
2.8.1. SWOT Analizinin Tanımı ve Önemi	42
2.8.2. SWOT Analizinin Unsurları	43
2.8.2.1. Güçlü Yönler (Strengths)	43
2.8.2.2. Zayıf Yönler (Weaknesses)	43
2.8.2.3. Fırsatlar (Opportunities)	44
2.8.2.4. Tehditler (Threats)	44
2.8.3. Tarihsel Gelişim ve Teorik Temeller	44
2.8.4. SWOT Analizinin Uygulama Aşamaları	45
2.8.5. Örnek Uygulamalar	45
2.8.5.1. Teknoloji Şirketi SWOT Analizi Örneği	45
2.8.5.2 KOBİ (Küçük ve Orta Büyüklükte İşletme) SWOT	
Analizi Örneği	46
2.8.6. SWOT Analizinin Avantaj ve Dezavantajları	46
2.8.6.1. Avantajları	46
2.8.6.2. Dezavantajları	47
2.9. SWOT Analizinin Geleceği ve Öneriler	47

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR ÜZERİNE SWOT ANALİZİ

3.1. Güçlü Yönler (Strengths)	50
3.1.1. Düşük Karbon Salınımı ve Çevre Dostu Özellik	50
3.1.2. Yüksek Enerji Verimliliği	52
3.1.3. Düşük İşletme ve Bakım Maliyetleri	54
3.1.4. Teknolojik Gelişme ve İnovasyon Potansiyeli	58
3.1.5. Enerji Bağımsızlığı ve Jeopolitik Avantaj	60
3.2. Zayıf Yönler (Weaknesses)	62
3.2.1. Yüksek İlk Yatırım Maliyeti	62
3.2.2. Sınırlı Şarj Altyapısı	65
3.2.3. Batarya Teknolojisi ile İlgili Sınırlamalar	67
3.2.4. Uzun Şarj Süreleri	73
3.2.5. Toplumsal ve Psikolojik Engel: Menzil Kaygısı (Range Anxiety)	78
3.3. Fırsatlar (Opportunities)	83
3.3.1. Hızla Gelişen Teknoloji ve Düşen Batarya Maliyetleri	83
3.3.2. Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu	89
3.3.3. Politik Teşvikler ve Düzenleyici Destek	93
3.3.4. Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine Doğrudan Katkı	97
3.3.5. Yeni İş ve Yatırım Fırsatları	102
3.4. Tehditler (Threats)	105
3.4.1. Ham Madde Kaynaklı Riskler ve Fiyat Dalgalanmaları	105
3.4.2. Altyapı Yatırımlarının Yetersizliği	108
3.4.3. Fosil Yakıt Lobilerinin ve Geleneksel Otomotiv	
Sektörünün Baskısı	111
3.4.4. Enerji Üretiminde Fosil Kaynakların Hâlâ Yüksek Payı	114
3.4.5. Teknolojik Değişimin Belirsizliği ve Pazar Adaptasyonu	117
SONUÇ	120
KAYNAKÇA	125

GİRİŞ

Enerji, modern toplumların ekonomik, sosyal ve çevresel dinamiklerini belirleyen en önemli unsurlardan biridir. Dünya nüfusunun artması, teknolojinin hızla gelişmesi ve kentleşme oranının yükselmesiyle birlikte enerji talebi de sürekli olarak artış göstermektedir. Bu talebin karşılanmasında geleneksel olarak kullanılan fosil yakıtlar, uzun yıllar boyunca ekonomik büyümenin ve sanayileşmenin temel itici gücü olmuştur. Ancak günümüzde, fosil yakıt kullanımının kaçınılmaz sonucu olan karbon emisyonlarının iklim değişikliğine yol açması, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve çevresel tahribatın ivme kazanması gibi faktörler, yeni ve sürdürülebilir enerji modellerine olan gereksinimi açık şekilde ortaya koymaktadır. Bu çerçevede yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, sürdürülebilir kalkınmanın gerçekleştirilmesi için kritik bir araç olarak kabul edilmektedir.

Yenilenebilir enerji, doğa tarafından sürekli yenilenen ve tükenme ihtimali düşük olan kaynaklardan elde edilen enerji biçimlerini ifade etmektedir. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle bu kapsamda en çok bilinen yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Söz konusu kaynaklar, geleneksel fosil yakıt kaynaklarına göre çok daha düşük karbon emisyonuna, çevre dostu teknoloji altyapısına ve uzun vadeli ekonomik avantajlara sahiptir. Dolayısıyla yenilenebilir enerji, sürdürülebilir kalkınmanın olmazsa olmaz bileşenleri arasında yer almaktadır. Sürdürülebilir kalkınma ise gelecek kuşakların ihtiyaçlarını tehlikeye atmadan mevcut kuşakların gereksinimlerini karşılamayı amaçlayan, ekonomik, sosyal ve çevresel boyutları bütüncül bir perspektifle ele alan bir kalkınma yaklaşımını ifade etmektedir.

Bu tez, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma kavramları arasındaki ilişkiyi çok yönlü olarak irdelemeyi, bu iki kavramın birbiriyle nasıl etkileştiğini ortaya koymayı ve özellikle elektrikli araçlar örneği üzerinden somut bir bakış açısı geliştirmeyi amaçlamaktadır. Günümüzde enerji sektöründe yaşanan köklü dönüşümler, yenilenebilir kaynaklara geçiş sürecini hızlandırırken; elektrikli araçlar gibi teknolojik yenilikler de bu sürecin toplumsal ve ekonomik boyutlarını derinden etkilemektedir. Elektrikli araçların giderek yaygınlaşması, ulaşım sektörünün fosil yakıt bağımlılığından kurtulması ve karbon emisyonlarının azaltılması bakımından büyük bir fırsat sunduğu gibi, şarj altyapısının geliştirilmesi, pillerin geri dönüştürülmesi, gerekli yasal düzenlemelerin ve teşvik mekanizmalarının oluşturulması gibi çok yönlü gereksinimleri de beraberinde getirmektedir.

Bu tezde, yenilenebilir enerji ile sürdürülebilir kalkınma arasındaki ilişkinin kuramsal çerçevesi çizildikten sonra, çeşitli ülkelerin enerji politikalarından ve uygulamalarından örnekler verilerek, yenilenebilir enerji kullanımının sosyoekonomik ve çevresel çıktıları analiz edilecektir. Aynı zamanda elektrikli araçlar üzerinden sektörel bir inceleme yapılacak; bu kapsamda SWOT analizi gibi stratejik bir değerlendirme aracı kullanılarak, elektrikli araç pazarının güçlü ve zayıf yönleri, mevcut ve gelecekteki fırsatlar ve olası tehditler bütüncül bir bakış açısıyla ele alınacaktır.

Tezin hazırlanmasında nitel ve nicel araştırma yöntemleri karma bir şekilde kullanılmıştır. Öncelikle konuya dair geniş bir literatür taraması gerçekleştirilmiş, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma bağlamında ulusal ve uluslararası raporlar, akademik makaleler, politik belgeler, strateji dokümanları ve güncel haber kaynakları incelenmiştir. Literatür taramasından elde edilen veriler ışığında, tez kapsamında ele alınan temel kavramlar ve kuramsal çerçeve şekillendirilmiştir. Özellikle enerji politikaları ve sürdürülebilir kalkınma alanlarında yapılan güncel çalışmaların sonuçları değerlendirilerek, tezde tartışılan görüşlerin bilimsel temele dayanması sağlanmıştır. Nicel analizlere dair veriler ise uluslararası kuruluşların (örneğin Uluslararası Enerji Ajansı, Dünya Bankası, Birleşmiş Milletler) yayınladığı istatistiksel veriler, ülkelerin enerji ve ulaşım alanındaki resmi istatistikleri ve sektörel raporlardan alınmıştır.

SWOT analizi, bu tezin en önemli metodolojik unsurlarından biridir. Araştırmanın üçüncü bölümünde ayrıntılı şekilde uygulanacak olan SWOT analizinde, elektrikli araçların güçlü (Strengths) ve zayıf (Weaknesses) yönleri tespit edildikten sonra, sektörü çevreleyen fırsatlar (Opportunities) ve tehditler (Threats) sistematik biçimde incelenecektir. Böylece yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma ekseninde, elektrikli araçların mevcut durumunu ve gelecekteki potansiyelini bütüncül bir perspektifle değerlendirmek mümkün olacaktır. Bu sayede politika yapıcılar, yatırımcılar ve araştırmacılar için, sektöre dair stratejik yol haritalarına katkı sunabilecek öneriler geliştirmek hedeflenmektedir.

Tezin yapısı üç ana bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde “Yenilenebilir Enerji ve Sürdürülebilir Kalkınma Kavramlarının Tanımı ve Kuramsal Çerçevesi” başlığı altında, ilk olarak enerji ihtiyacı ve buna bağlı küresel sorunlar ele alınmakta, ardından yenilenebilir enerji kaynakları hakkında detaylı bilgi sunulmaktadır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve

biyokütle gibi temel yenilenebilir enerji türlerinin özellikleri, avantajları ve yaygın kullanım alanları incelenmektedir. Ayrıca, Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri, Çin ve Türkiye gibi çeşitli ülke ve bölge örnekleri üzerinden yenilenebilir enerji politikaları, uygulama stratejileri ve gelecek perspektiflerine dair genel bir çerçeve çizilmektedir. Sürdürülebilir kalkınma kavramının tanımı, tarihçesi ve temel hedefleri de bu bölümde yer almaktadır.

İkinci bölüm olan “Yenilenebilir Enerji ile Sürdürülebilir Kalkınma Arasındaki İlişki” başlığı altında, yenilenebilir enerji politikalarının ekonomik, sosyal ve çevresel boyutları analiz edilmektedir. Ekonomik etkiler altında; yatırım maliyetleri, finansman modelleri, istihdam yaratma potansiyeli ve enerji arz güvenliği gibi konular değerlendirilmektedir. Sosyal boyutta ise enerjiye erişim, kırsal kalkınma ve toplumsal eşitlik gibi unsurlar ön plana çıkarılmaktadır. Çevresel boyutta ise karbon emisyonlarının azaltılması, doğal kaynakların korunması ve biyoçeşitliliğin sürdürülmesi gibi kritik konular ele alınmaktadır. Bu bölümde ayrıca, mevcut politika ve uygulamalar hakkında bir değerlendirme sunulmakta, Türkiye’deki güncel durum ve uluslararası çerçeveler incelenmektedir. Karşılaşılan zorluklar ve geleceğe yönelik öngörüler, yenilenebilir enerjinin sürdürülebilir kalkınmadaki rolünün daha da güçlenebilmesi için gereken adımları işaret etmektedir. Bu bölümde ayrıca, “SWOT Analizi Nedir” başlığı ile tezde kullanılacak stratejik analiz aracının teorik temelleri ve uygulama aşamaları sunulmaktadır. SWOT analizinin tarihsel gelişimi, analiz unsurları (güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar, tehditler) ve bu unsurların nasıl bir yöntemle değerlendirileceği üzerine kuramsal bir çerçeve çizilmektedir. Ayrıca, çeşitli örnek uygulamalar ve farklı sektörlerden SWOT analizleri incelenerek, bu metodun avantajları ve dezavantajları tartışılmaktadır. Bu bölümün amacı, dördüncü bölümde gerçekleştirilecek elektrikli araçlara yönelik SWOT analizine sağlam bir teorik ve metodolojik altyapı hazırlamaktır.

Üçüncü bölüm olan “Elektrikli Araçlar Üzerine SWOT Analizi” başlıklı bölüm, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma ekseninde tezimizin odağını oluşturan özel bir örnek olay incelemesi sunmaktadır. İlk olarak elektrikli araçların tanımı, tarihsel gelişimi ve teknolojik bileşenleri açıklanmakta; ardından mevcut pazar durumu ve sektör trendleri özetlenmektedir. Bu kapsamda, elektrikli araç pazarının küresel ölçekte nasıl büyüdüğü, hangi ülkelerin lider konumda olduğu, teknolojik gelişmelerin hangi yönde ilerlediği ve tüketici davranışlarının ne şekilde değiştiği anlatılmaktadır. Sonrasında, elektrikli araçların sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle

olan ilişkisi irdelenmekte; çevresel, ekonomik ve sosyal açılardan getirdiği avantajlar ve yaratabileceği sorunlara değinilmektedir. SWOT analizi yardımıyla, elektrikli araçların güçlü ve zayıf yönleri sistematik olarak sınıflandırılmakta, sektördeki fırsatlar ve tehditler detaylı bir şekilde ortaya konmaktadır. Bu analiz, stratejik öneriler geliştirilmesine zemin hazırlayarak tezimizin ana araştırma sorularından birine yanıt aramaktadır.

Bu giriş bölümü kapsamında özetlenen yapı, tez boyunca yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma kavramlarının geniş perspektifte tartışılmasını ve ardından elektrikli araçlar örneği üzerinden derinlemesine bir değerlendirme yapılmasını mümkün kılacaktır. Kuramsal çerçeve ve literatür taramasına dayanan yaklaşım, hem mevcut bilgiler ışığında analitik bir değerlendirme sunmayı hem de uygulamaya dönük çıkarımlarda bulunmayı hedeflemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının giderek çeşitlendiği, teknolojik gelişmelerin hız kazandığı ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin küresel çapta belirgin bir öncelik haline geldiği bu dönemde, elektrikli araçlar gibi somut örnekler üzerinden konuyu incelemek, akademik ve pratik açıdan önemli faydalar sağlayacaktır.

Tezin amacı, öncelikle yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma kavramlarının temel niteliklerini ortaya koyarak, bu iki önemli olgunun birbirini nasıl desteklediğini ve zaman zaman hangi açılardan zorluklarla karşı karşıya kalılabileceğini göstermektir. İkinci olarak, teorik ve uygulamalı araştırma yöntemlerini bütünleştirerek, elektrikli araçlar örneği üzerinden yenilenebilir enerji kullanımının somut çıktıları ve gelecekteki potansiyeli değerlendirilecektir. Son olarak, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınmaya yönelik politika, strateji ve uygulamalara dair genel bir çerçeve sunarak, ilgili aktörlere (kamu, özel sektör ve sivil toplum kuruluşları) öneriler getirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu bağlamda, tez çalışmasının hem akademik literatüre katkı sağlaması hem de karar vericiler, politika yapımcılar ve yatırımcılar için yol gösterici nitelikte bazı sonuçlar ve öneriler ortaya koyması beklenmektedir. Özellikle enerji ve ulaştırma sektörleri başta olmak üzere, yenilikçi teknolojilere yönelim sürecinin hızlandığı, karbon emisyonlarını azaltmanın acil bir ihtiyaç halini aldığı ve sürdürülebilir kalkınmaya yönelik farkındalığın arttığı günümüzde, yenilenebilir enerji ile entegre edilmiş çözümlerin değeri giderek daha fazla hissedilmektedir. Elektrikli araçlar örneği, bu dönüşüm sürecinin enerji, çevre, ekonomi ve toplum kesişiminde yer alan çok yönlü yapısını somut bir şekilde göstermesi bakımından önemlidir.

Tüm bu açıklamalar doğrultusunda, tezde ulaşılan genel bulgular ve değerlendirmeler, sonuç bölümünde daha bütüncül bir bakışla özetlenecek ve geleceğe yönelik önerilerle birlikte sunulacaktır. Böylece yenilenebilir enerji ile sürdürülebilir kalkınma arasındaki etkileşimin, enerji sektöründe yaşanan teknolojik ve politik dönüşümler bağlamında nasıl şekillendiğine dair kapsamlı bir çerçeve çizilmesi hedeflenmektedir.

Bu giriş bölümü, tez çalışmasının temel argümanlarının, amaçlarının, yönteminin ve yapısının genel bir özetini sunarken, aynı zamanda yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma konusunun neden önemli olduğunu vurgulamaktadır. Önümüzdeki bölümlerde, konuya daha ayrıntılı ve sistematik bir yaklaşım sergilenerek, yenilenebilir enerji ile sürdürülebilir kalkınma arasındaki bütüncül ilişki derinlemesine değerlendirilecektir. Özellikle elektrikli araçlar örneği üzerinden yapılan kapsamlı SWOT analizi, geleceğe dönük stratejik planlamalar için yol gösterici nitelikte önemli çıkarımlar sağlayacaktır. Bu çerçevede, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma alanında artan ilgi ve farkındalığın hem akademik çalışmalar hem de uygulamalar açısından yeni kapılar açması beklenmektedir.

BİRİNCİ BÖLÜM

YENİLENEBİLİR ENERJİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA KAVRAMLARININ TANIMI VE KURAMSAL ÇERÇEVESİ

Enerji, ülkelerin iktisadi ve sosyal boyutlu gelişimlerinde önemli bir role sahiptir. Sanayi Devrimi'nden günümüze kadar olan süreç incelendiğinde insanlığın refahı, büyük ölçüde enerji kaynaklarının kullanım biçimiyle şekillendiği görülmektedir. Fosil yakıtların yani yenilenemez kaynakların aşırı şekilde kullanımı, küresel ısınma, iklim değişikliği gibi çevresel problemlerin ana sebebi hâline gelmiştir. Özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısından sonra bilimsel araştırmalar, karbon salımlarının artışıyla atmosferdeki sera gazı yoğunluğunun yükseldiğini ve bunun da iklim krizini tetiklediğini açıkça ortaya koymaktadır.

Ekonomik büyümeye bağlı olarak, kentleşme ve artan nüfus gibi dinamikler enerji talebindeki yükselişi kaçınılmaz kılmaktadır. Gelgelelim, yenilenemez enerji kaynaklarının sınırlı bir yapıda olması ve bunların kullanımının çevre üzerinde yarattığı yıkıcı etkiler, yeni enerji kaynak arayışlarına zemin hazırlamaktadır. Bu noktadan bakıldığında, yenilenebilir enerji kaynakları ön plana çıkmakta ve sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle iç içe geçen bir olgu olarak önem kazanmaktadır. Nitekim yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma kavramlarının bütüncül biçimde ele alınması, günümüzün en acil küresel sorunlarına çözüm üretme noktasında merkezî bir öneme sahiptir. Bu bölümde, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma kavramlarını tanımlamak ve bunları kuramsal bir çerçeve içerisinde inceleyerek aralarındaki ilişkiyi ortaya koymaktır.

1.1.Enerji İhtiyacı ve Küresel Sorunlar

Enerji ihtiyacı özellikle Sanayi Devrimi'nden bu yana hızlı bir biçimde yükselmiş ve bu yükseliş, ekonomik büyümenin yanı sıra teknolojik gelişmelerle de desteklenmiştir (Cleveland, 2017, s. 22). Dünya nüfusunun hızla artmasına bağlı olarak üretim faaliyetlerinin artması ve kentleşme olgusu enerji tüketiminde belirgin bir büyümeye yol açarken, bu büyüme özellikle fosil yakıt kullanımının yaygınlaşmasını beraberinde getirmektedir (Bayraç, 2009, s.116). Kömür, petrol ve doğal gaz gibi yüksek enerji yoğunluğuna sahip kaynaklar, sanayi ve ulaşım sektörlerinin temel yakıtları hâline gelerek ülkelerin kalkınma politikalarında kritik bir

rol üstlenmektedir (Hoffman, 2017, s. 18). Ancak fosil yakıtların yoğun biçimde kullanımı, karbon emisyonlarının yükselmesine ve iklim değişikliği başta olmak üzere küresel çapta çevresel sorunların derinleşmesine neden olmaktadır (IPCC, 2018, s. 8). Bu noktada, ulaşım sektörünün karbon emisyonlarına yaptığı büyük katkı dikkate alındığında elektrikli araçlar, fosil yakıtlara dayalı ulaşım sisteminin yarattığı sorunları hafifletme potansiyeliyle öne çıkmaktadır (IEA, 2021, s. 22). İçten yanmalı motorlu araçlardan farklı olarak, elektrikli araçlar egzoz emisyonlarını ortadan kaldırarak hava kirliliğini azaltmakta ve kentsel bölgelerde daha sağlıklı yaşam koşullarına katkı sunmaktadır (Mozafar, vd., 2018, s. 185).

Bugün gelinen noktaya bakıldığında, küresel ısınmanın tetiklediği ekstrem hava olayları, eriyen buzullar ve yükselen deniz seviyeleri gibi tehditler, iklim sistemi üzerinde geri döndürülemez sonuçlar yaratmaktadır (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022, s. 12). Öte yandan, dünyanın farklı bölgelerinde yaşanan enerji arzı dalgalanmaları, jeopolitik gerilimlere ve ekonomik istikrarsızlıklara kapı aralamaktadır (Emeksiz ve Fındık, 2021, s.156). Fosil yakıt kaynaklarının belli coğrafyalarda yoğunlaşması, ithalatçı ve ihracatçı ülkeler arasında farklı güç dinamikleri ortaya çıkarmakla kalmayıp, enerji güvenliğini de uluslararası ilişkilerin gündemine taşımaktadır (Balcı, 2023, s. 201). Bunun yanı sıra, dünya genelinde 800 milyondan fazla insanın hâlen elektrik erişiminden yoksun olduğu gerçeği, “enerji yoksulluğu” kavramını öne çıkarmaktadır (UNDP, 2019, s. 4). Enerjiye erişim, sağlık, eğitim ve istihdam gibi temel insani faaliyetler için kritik bir ön koşul olduğundan, bu erişim eksikliği toplumsal ve ekonomik eşitsizlikleri daha da derinleştirmektedir (Sen, 1999, s. 12). Elektrikli araçların küresel ölçekte benimsenmesi ise bu tabloyu kısmen iyileştirme potansiyeline sahiptir; zira ulaşım sektöründe elektriğin yakıt olarak kullanılması, yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğin kullanımını artırarak hem enerji yoksulluğunun azaltılmasına hem de karbon emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlayabileceği düşünülmektedir (Randers ve Meadows, 2004, s. 88).

Yenilenebilir enerji teknolojileri ve enerji verimliliği projeleri, enerji ihtiyacının sürdürülebilir yollarla karşılanması için en önemli çözümler arasında yer almaktadır (IRENA, 2021, s. 26). Bununla birlikte, elektrikli araç pazarının genişlemesi, batarya teknolojilerinin geliştirilmesi, şarj altyapısının yaygınlaştırılması ve uygun enerji politikalarının uygulanmasıyla yakından ilişkilidir (IEA, 2021, s. 28). Batarya üretimi için lityum, kobalt ve nikel gibi kritik metallerin temini ve geri

dönüşümü de küresel arz güvenliği ve sürdürülebilir hammadde yönetimi açısından önem kazanmaktadır (Mozafar, vd., 2018, s. 154). Ayrıca, sadece teknolojik yenilikler değil, finansman, politika yapımı ve toplumsal katılım boyutları da enerji dönüşüm sürecinin başarısında belirleyici rol oynamaktadır (World Bank, 2021, s. 19). Karbon vergisi, emisyon ticaret sistemleri ve yeşil tahvil gibi mekanizmalar, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak yenilenebilir enerji yatırımlarını ve elektrikli araçlara geçişi teşvik edebilmektedir (Goulder & Schein, 2013, s. 36).

Gelecek yıllarda, enerji talebinin daha da artacağı öngörülmekte ve bu talebin sürdürülebilir yollarla karşılanması, iklim krizinin etkilerini hafifletmek açısından elzem görülmektedir (Mozafar, vd., 2018, s. 159). Bunun için Paris Anlaşması gibi uluslararası anlaşmalar çerçevesinde ülkelerin ortak çaba göstermesi, yatırım, teknoloji transferi ve kapasite geliştirme gibi alanlarda iş birliklerini artırması gerekmektedir (UN, 2015, s. 12). Elektrikli araçlar, bu dönüşümün itici gücü olabileceği gibi, enerji verimliliği ve yenilenebilir kaynakların entegrasyonunu destekleyerek elektrik şebekesine esneklik kazandırabilir (NREL, 2019, s. 5). Ancak bu sürecin adil ve kapsayıcı olması için, enerjiye erişimi olmayan kesimlere yönelik özel politikaların uygulanması, yerel toplulukların projelere katılımı ve sosyoekonomik dengesizlikleri azaltan tedbirlerin alınması zorunludur (Tury, 2019, s. 114). Sonuç olarak, enerji ihtiyacının küresel boyutlarını ve bunların tetiklediği sorunları elektrikli araçlar çerçevesinde ele almak, sürdürülebilir ve iklim dostu bir gelecek inşa etmek adına önemli bir fırsat penceresi sunmaktadır (Stern, 2018, s. 17).

1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Enerji kavramı, mikro anlamda bireylerin temel gereksinimlerinin giderilmesi ve iktisadi ilişkilerin oluşturulmasının yanında, makro anlamda da ülkelerin ekonomik gelişmişlik düzeylerini etkileyen önemli unsurların başında gelmektedir (Bayrak ve Esen, 2014, s. 139-140). Günümüz dünyasında hızla artan nüfus yoğunluğu, yaşanan teknolojik gelişmeler, önemli enerji kaynaklarının bulunduğu stratejik noktalarda yaşanan siyasi istikrarsızlar, küresel anlamda yaşanan iklim değişiklikleri gibi olaylar enerji kaynaklarının önemini artırmıştır. Bu yaşanan olaylar dolayısıyla enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanımına yön veren devlet politikaları uygulanmaya çalışılmaktadır (Koçaslan, 2014, s. 118).

Enerji kavramı, klasik iktisatçılar dahil olmak üzere günümüze kadar birçok iktisatçı tarafından incelenmiştir. Enerji kavramına, günlük hayatımızdan örneklerle

baktığımızda hem evimizi ısıtan hem de ulaşımımızı sağlayan arabaların yakıtı olarak tüketim malı şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Ülke ekonomileri kapsamında değerlendirildiğinde de üretim sektörü için girdi olarak karşımıza çıkmaktadır. İktisadi olarak incelendiğinde enerji kavramının hem girdi hem de çıktı olarak hayatımızda önemli yer edindiği görülmektedir. Hayatımızın her alanında karşımıza çıkan enerji, yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bu ikili ayrıma göre yenilenebilen enerji kaynakları, döngü sürecinde değişmeden kalan, tüketilmesine rağmen azalış sergilemeyen şekilde tanımlanabilmektedir. Diğer enerji kaynağımız olan yenilenemeyen enerji kaynakları ise, yenilenebilir enerji kaynaklarının tam tersi tanımına sahiptir, azalır ve tükenir (Akdoğan, 2018, s.3-4).

Yenilenebilir enerji kaynakları “doğanın kendi evrimi içinde bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı” olarak ifade edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli özellikleri incelendiğinde; “karbondioksit emisyonlarını azaltarak çevrenin korunmasına yardımcı olmaları, yerli kaynaklar oldukları için enerjide dışa bağımlılığın azalmasına ve istihdamın artmasına katkıda bulunmaları ve kamuoyundan yaygın ve güçlü destek almaları” olduğu görülmektedir. Bu özelliklere bakıldığında; yenilenebilir enerji kaynaklarının ulaşılabilirlik (Accessibility), mevcudiyet (Availability) ve kabul edilebilirlik (Acceptability) gibi özelliklerin tümünü bünyesinde barındırdığı görülmektedir (Mfa.gov.tr, 2024).

Bilindiği üzere, insanoğlunun geçmişten günümüze doğaya hakim olma ve kendi çıkarları doğrultusunda yönetme isteği ve bu yönetme isteği doğrultusunda doğa tahribi, her geçen zaman diliminde devletlerin ve güçlü sermayelerin çıkarları doğrultusunda daha da büyük seviyelere ulaşmaktadır. Sanayi Devrimiyle birlikte hız kazanan bu süreç, nüfusun artması ve buna bağlı olarak enerji ihtiyacının artmasıyla devam etmiştir. Özellikle endüstri, barınma veya başka sebepler doğrultusunda inşa edilen bina ve ulaşım gibi ihtiyaçlarımızın karşılanması doğrultusunda enerji kaynaklarının bilinçsizce kullanılması sebebiyle de bu süreci çevre problemleri takip etmiştir (Öymen ve Ömeroğlu, 2020, s. 1070).

Kömür, petrol, doğalgaz ve nükleer enerji gibi yenilenemeyen (geleneksel) enerji kaynaklarının kullanımı doğayı ve insan hayatını zamanla daha fazla tehdit oluşturacak hale gelmiştir. Yenilenemeyen (geleneksel) enerji kaynaklarının, ulaşım sektöründe öncü olmak üzere, konut yapımı ve sanayi alanında öncelikli kullanımı problemler zincirini daha da kapsamlı hale getirmektedir. Ulaştırma sektörü incelendiğinde, enerji tüketiminin yaklaşık olarak %95 inin petrolden karşılandığı

görülmektedir. Bu orana göre önümüzdeki 5 yıl sürecinde, gelişmiş ekonomiye sahip ülkelerde %1.5 iktisadi olarak gelişmekte olan ülkelerde ise %3.6 oranında artış olması beklenmektedir (Mfa.gov.tr, 2024).

Tablo 1: Yenilenebilir Enerji Türleri, Tanımı ve Avantajları

YENİLENEBİLİR ENERJİ TÜRLERİ	TANIMI	AVANTAJLARI
Güneş Enerjisi	Güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik paneller aracılığıyla elde edilir.	Sınırsız ve sıfır karbon emisyonu.
Rüzgâr Enerjisi	Rüzgâr türbinleri yardımıyla rüzgârın kinetik enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür.	Çevre dostu ve düşük işletme maliyeti.
Hidroelektrik Enerjisi	Akarsuların veya barajların kinetik enerjisi kullanılarak elektrik üretimi gerçekleştirilir.	Yüksek verimlilik ve enerji depolama potansiyeli.
Jeotermal Enerji	Yer altındaki sıcak su veya buhar kaynaklarından enerji elde edilir.	Sürekli ve karbonsuz enerji kaynağı.
Biyokütle Enerjisi	Organik atıklar veya biyolojik malzemelerin yakılmasıyla enerji üretilir.	Atık yönetimi ve enerji üretimini birleştirir.

Kaynak: (Twidell & Weir, 2015).

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğanın kendi döngüsü içerisinde sürekli olarak yenilenen ve tükenme riski minimal düzeyde bulunan enerji türlerini ifade eder (Mozafar, vd., 2018, s. 163). Bu kaynaklara yönelim, fosil yakıtların sebep olduğu karbon salımlarının azaltılması ve iklim krizine karşı mücadele kapsamında giderek hız kazanmaktadır (IPCC, 2022, s. 14). Aynı zamanda yenilenebilir enerji, yerel kalkınma ve istihdam yaratma potansiyeliyle de sürdürülebilir bir gelecek inşa etme hedefinin merkezinde yer almaktadır (IRENA, 2023, s. 7). Aşağıda, beş temel yenilenebilir enerji kaynağı tanıtılmaktadır.

1.2.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, fotovoltaik (PV) paneller veya termal sistemler aracılığıyla Güneş'ten gelen ışının elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülmesi sürecini ifade eder (Boyle, 2019, s. 23). Son yıllarda güneş paneli maliyetlerinde yaşanan önemli düşüş, bu kaynağın küresel ölçekte yaygınlaşmasını sağlamıştır. IRENA (2023, s. 9) verilerine göre, dünyada kurulu güneş enerjisi gücü 2020'den bu yana yaklaşık %25 oranında artış göstermiştir. Özellikle çatı tipi güneş panelleri hem bireysel tüketiciler hem de küçük işletmeler arasında popülerlik kazanarak enerji bağımsızlığını artırmaktadır (World Bank, 2022, s. 18).

1.2.2. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisinde atmosferik hava akışından elde edilen kinetik enerji, rüzgâr türbinleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Rüzgâr enerjisinden faydalanma son beş yılda özellikle Avrupa, Çin ve ABD'de hızlı bir ivme yakaladığı görülmektedir. Bu artış, karbon salımının azalmasına katkı sunduğu gibi yerel istihdam olanaklarını da önemli ölçüde genişletmektedir (IRENA, 2023, s. 10).

1.2.3. Hidroelektrik Enerji

Hidroelektrik enerji, barajlarda veya akarsu üzerinde biriken suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden yararlanarak elektrik üretimini amaçlamaktadır. Sürekli ve güvenilir üretim profilinin yanı sıra, depolama kapasitesi sayesinde elektrik şebekesine denge sağlamada kritik bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, büyük ölçekli baraj projeleri, ekolojik dengeler ve sosyal boyutta yerinden edilme gibi konularda tartışmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle hidroelektrik projelerin planlanmasında çevresel etki değerlendirmelerinin (ÇED) titizlikle yürütülmesi önem taşımaktadır (IPCC, 2022, s. 16)

1.2.4. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yer kabuğundaki yüksek sıcaklıktaki su veya buharın kullanılmasıyla elektrik ve ısı elde edilmesi esasına dayanan bir kaynaktır (Boyle, 2019, s. 27). Jeotermal tesisler, mevsim koşullarından bağımsız olarak sürekli enerji üretebilme avantajı sunmaktadır (NREL, 2021, s. 7). Ancak jeotermal enerji kullanımının hayata geçirilebilmesi, verimli su veya buhar rezervuarlarının keşfi ve sondaj maliyetlerinin karşılanması gibi özel gereksinimleri doğurmaktadır (Mozafar,

vd., 2018, s. 167). Buna karşın başarılı projeler, ısınma ve elektrik üretiminde fosil yakıt bağımlılığını büyük ölçüde azaltabilmektedir (Stern, 2018, s. 5).

1.2.5. Biyokütle Enerjisi

Biyokütle, tarımsal atıklar, orman ürünleri ve organik kökenli atıkların enerjiye dönüştürülmesini içermektedir (Hoffman, 2017, s. 20). Atık yönetimi ile enerji üretiminin bütünleştirilmesi sayesinde hem ekolojik kirliliğin önüne geçilebilir hem de kırsal kesimde ekonomik fırsatlar yaratılabilmektedir (IRENA, 2023, s. 11). Biyokütle enerjisinin karbon nötr kabul edilmesi, bitkilerin büyüme esnasında atmosferden emdiği karbonla ilişkilidir; ancak monokültür tarım ve ormansızlaşma gibi sorunlar, biyokütlenin sürdürülebilirliği açısından dikkate alınması gereken noktalardan biri olmaktadır (IPCC, 2022, s. 17).

1.3. Yenilenebilir Enerji Politikaları ve Gelecek Perspektifleri

Yenilenebilir enerji politikaları, iklim değişikliği, enerji güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda küresel ölçekte giderek daha önemli hâle gelmektedir (IPCC, 2022, s. 14). Bu politikaların başarısı, ülkelerin mevzuat, finansman ve teknolojik altyapı düzeyindeki hazırlıklarıyla yakından ilişkilidir (IRENA, 2023, s. 5). Bu başlık altında Avrupa Birliği, ABD, Çin ve Türkiye ölçeğinde yenilenebilir enerji politikalarına değinilmektedir.

1.3.1. Avrupa Birliği

Avrupa Birliği (AB), “Avrupa Yeşil Mutabakatı” (European Green Deal) kapsamında 2050 yılına kadar karbon nötr olma hedefiyle çığır açan bir politika çerçevesi benimsemiştir (European Commission, 2021, s. 4). AB üyesi ülkeler arasında yenilenebilir enerji oranı ortalaması, 2021 verilerine göre %22,1 düzeyindedir (Eurostat, 2022, s. 12). Bu oran 2010 yılında %12,5 civarındayken son on yılda ciddi bir atılım gerçekleşmiş ve özellikle rüzgâr ve güneş enerjisinde kapsamlı yatırımlar devreye alınmıştır (IRENA, 2023, s. 19). Almanya, Danimarka ve İspanya gibi ülkeler, rüzgâr enerjisindeki hızlı büyümeyle öne çıkarken; Yunanistan ve Portekiz güneş enerjisinde son dönemde rekor seviyelerde kurulum gerçekleştirmiştir (European Commission, 2021, s. 9). Aynı zamanda AB Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) gibi mekanizmalar fosil yakıtlara dayalı elektrik üretimini kademeli olarak azaltarak yenilenebilir kaynaklara yönelimi teşvik etmektedir (Goulder & Schein, 2013, s. 35).

Elektrikli araç (EV) kullanımının hızla yaygınlaşması, AB'nin karbon emisyonlarını azaltma politikalarında önemli bir yer tutmaktadır. 2022 yılında AB genelinde elektrikli araç satışlarının toplam otomobil satışlarına oranı %12 seviyesine yaklaşırken, bu oranın 2030'a kadar %50'ye çıkması hedeflenmektedir (European Automobile Manufacturers' Association [ACEA], 2022, s. 8). Özellikle Almanya, Fransa ve Hollanda gibi ülkeler, vergi indirimleri, hibe programları ve şarj altyapısını geliştirmeye yönelik yatırımlarla EV pazarını genişletmeye devam etmektedir (NREL, 2021, s. 10).

Gelecek perspektifinde, AB'nin planı 2030 yılına kadar toplam enerji tüketiminin en az %32,5'inin yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasıdır (European Commission, 2021, s. 11). Bu hedef, ulaşım sektörü için de önemlidir; zira elektrikli araçların kullandığı elektriğin yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi, karbon ayak izini daha da düşürecektir (Mozafar, vd., 2018, s. 182). Akıllı şebeke teknolojileri, enerji depolama sistemleri ve şarj altyapısının yaygınlaştırılması, AB içindeki sıfır emisyonlu ulaşım sisteminin temel dayanaklarını oluşturmaktadır (NREL, 2021, s. 12).

1.3.2. Amerika Birleşik Devletleri

Amerika Birleşik Devletleri (ABD), enerji sektöründe halen dünyanın en büyük petrol ve doğal gaz üreticilerinden biri olmakla birlikte, yenilenebilir enerjiye yönelik yatırımlar da hızla artmaktadır (EIA, 2022, s. 5). 2022 yılında ABD'nin elektrik üretiminde yenilenebilir kaynakların payı %21 civarına ulaşmış olup bunun içinde rüzgâr ve güneşin payı giderek yükselmektedir (IRENA, 2023, s. 20). “Enflasyonu Düşürme Yasası” (Inflation Reduction Act) gibi yeni yasal düzenlemeler, yenilenebilir enerji projelerine önemli miktarda vergi teşviki getirerek özel sektör yatırımlarını hızlandırmaktadır (Mozafar, vd., 2018, s. 175).

Elektrikli araçlar, ABD'nin karbon nötr olma yolculuğunun kritik bir ayağını oluşturmaktadır. 2022 sonu itibarıyla ülkede satılan yeni otomobillerin yaklaşık %7'sini elektrikli araçlar oluşturmaktadır (EIA, 2022, s. 14). Biden yönetimi, 2030 yılına kadar yeni araç satışlarının %50'sinin elektrikli olması için altyapı projeleri ve finansal teşvikleri içeren kapsamlı bir strateji yürürlüğe koymuştur (Stern, 2018, s. 11). Ayrıca, devreye alınan federal desteklerle otoyollarda hızlı şarj istasyonları kurulumu hızlandırılmakta ve içten yanmalı motora sahip araçların egzoz emisyonları kademeli olarak sınırlandırılmaktadır (World Bank, 2022, s. 21).

ABD yönetiminin hedefi, 2035 yılına kadar elektrik sektöründe karbon nötr bir yapıya geçmek ve 2050 yılına kadar ekonomi genelinde net sıfır emisyon seviyesine ulaşmaktır (EIA, 2022, s. 9). Özellikle rüzgâr enerjisinde Teksas gibi eyaletler lider konumdayken, güneş enerjisinde Kaliforniya'nın öncülüğü söz konusudur (Stern, 2018, s. 9). Denizdeki (offshore) rüzgâr projeleri, Doğu Kıyısı'nda artış göstermekte ve elektrikli araç kullanımıyla entegre bir temiz enerji ekosisteminin oluşmasını hedeflemektedir (World Bank, 2022, s. 24).

1.3.3. Çin

Çin, 2000'li yılların başından bu yana dünya enerji sahnesinde yenilenebilir yatırımların en hızlı arttığı ülkelerden biridir (Li & Wang, 2020, s. 110). 2022 yılında Çin'in yenilenebilir enerji kurulu gücü 1.210 GW seviyesini aşarak küresel lider konuma gelmiştir (IRENA, 2023, s. 25). Bu büyümede, güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri üretim maliyetlerinin düşmesinin yanı sıra devlet destekli teşvik politikaları etkili olmuştur (NREL, 2021, s. 9). Özellikle rüzgâr türbini bileşenleri ve güneş paneli üretiminde dünyanın en büyük tedarikçisi hâline gelen Çin, ihracat gelirlerini de arttırarak enerji teknolojileri alanında jeopolitik gücünü pekiştirmektedir (World Bank, 2022, s. 25).

Elektrikli araç piyasasında da Çin büyük bir atılım yapmış durumdadır. 2022 verilerine göre dünyada üretilen elektrikli araçların yaklaşık %45'i Çin menşelidir ve iç pazarda yeni araç satışlarında elektrikli modellerin payı %25'e kadar yükselmiştir (Li & Wang, 2020, s. 113). Yerli otomotiv markaları, batarya teknolojileri ve altyapı geliştirme alanlarında hızlı bir büyüme gösterirken, kamu teşvikleri ve vergi indirimleri de bu gelişmeyi desteklemektedir (Stern, 2018, s. 14).

2050 yılı hedeflerinde, Çin'in enerji karışımında yenilenebilir kaynakların payını %60'ın üzerine çıkarmayı ve elektrikli araç satışlarını toplam hafif araç Pazarının %70 seviyesine kadar yükseltmeyi planladığı ifade edilmektedir (IRENA, 2023, s. 30). Buna karşın, hâlen kömür kullanımının yüksek seviyelerde olması ve bazı bölgelerde hava kirliliğinin kritik boyutlara ulaşması, enerji dönüşümünün hızlandırılmasına yönelik toplumsal ve uluslararası baskıyı artırmaktadır (IPCC, 2022, s. 16).

1.3.4. Türkiye

Türkiye, coğrafi konumu ve doğal kaynakları itibarıyla önemli bir yenilenebilir enerji potansiyeline sahiptir (Balcı, 2023, s. 205). 2022 yılı verilerine göre, Türkiye'nin elektrik üretiminde yenilenebilir kaynakların payı %44'e yaklaşmış olup hidrolik, rüzgâr ve güneş enerjisi başı çekmektedir (ETKB, 2023, s. 10). Son dönemde özellikle rüzgâr ve güneş enerjisi kurulumlarındaki artış, YEKA (Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları) ihaleleri ve teşvik mekanizmaları sayesinde hız kazanmıştır (Emeksiz ve Fındık, 2021, s.160).

Elektrikli araçlar konusunda ise Türkiye, henüz küresel ölçekteki yaygınlaşmaya oranla gelişme sürecindedir. 2022 yılında elektrikli araç satışlarının toplam pazar payı %2 düzeyine yaklaşmış olup, ulusal otomotiv üreticileri ve girişimler yerli elektrikli araç modelleri üzerinde çalışmaktadır (ETKB, 2023, s. 14). Şarj altyapısının hızla geliştirilmesi amacıyla kamu-özel sektör iş birliği projeleri devreye alınmış, büyük şehirlerde hızlı şarj istasyonlarının sayısı önemli ölçüde artırılmıştır (Balcı, 2023, s. 230).

Gelecek perspektifinde, Türkiye'nin 2030 yılına kadar yenilenebilir kaynaklardan elde ettiği kurulu gücü 90 GW düzeyine çıkarmayı hedeflediği belirtilmektedir (ETKB, 2023, s. 12). Bu artışla paralel şekilde, elektrikli araçların ihtiyaç duyduğu temiz enerjinin şebekeye entegrasyonu da kolaylaşacak ve fosil yakıt bağımlılığının azalması beklenmektedir (Emeksiz ve Fındık, 2021, s.162). Bununla birlikte, doğalgaz ve kömür kullanımının hâlen önemli bir paya sahip olması ile finansman ve teknoloji transferi alanındaki zorluklar, enerji dönüşüm sürecini yavaşlatan etkenler olarak dikkat çekmektedir.

1.4. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımının Önemi

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının önemi, iklim değişikliğiyle mücadele, enerji güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri çerçevesinde giderek daha belirgin bir hâle gelmektedir (IPCC, 2022, s. 14). Fosil yakıtların yol açtığı yoğun karbon salımı, küresel ısınma ve hava kirliliği gibi çevresel tehditleri tetiklerken, yenilenebilir kaynaklara yönelik yatırımlar bu sorunlara kalıcı çözümler sunmayı amaçlamaktadır (IRENA, 2023, s. 5). Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji türleri, doğa döngüsü içerisinde sürekli kendini yenilediği için tükenme riski minimaldir (Boyle, 2019, s. 22). Üstelik bu kaynaklar,

yerelde kullanılabildikleri ölçüde ithalat bağımlılığını azaltarak ülkelerin enerji güvenliğini pekiştirir (World Bank, 2022, s. 19).

Yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişmesi, sadece çevresel kazanımlarla sınırlı kalmayıp aynı zamanda ekonomik ve toplumsal faydalar da yaratmaktadır. Örneğin, yerel rüzgâr ve güneş enerjisi projeleri kırsal bölgelerde istihdamı artırırken, dışa bağımlılığı azaltarak enerji arz güvenliğini güçlendirir (Goulder & Schein, 2013, s. 38). Karbon nötr üretim süreçlerini benimseyen işletmeler, uluslararası ticaret ve rekabet sahasında avantaj elde etmekte, uzun vadede sürdürülebilir büyüme trendlerini desteklemektedir (World Bank, 2022, s. 20). Aynı zamanda, enerji depolama teknolojilerindeki ilerlemeler, güneş ve rüzgâr gibi kesintili kaynakların şebekeye entegrasyonunu kolaylaştırarak elektrik kesintisi riskini azaltmakta ve esnek bir enerji sistemi kurmayı mümkün kılmaktadır (NREL, 2021, s. 9).

Yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaşması, sera gazı emisyonlarını azaltarak küresel ısınmanın etkilerini hafifletmenin yanı sıra doğal kaynakların korunması ve gelecek nesillerin yaşam koşullarının güvence altına alınması bakımından da kritik bir öneme sahiptir (Meadows, Randers & Meadows, 2004, s. 90). İklim değişikliği kaynaklı ekstrem hava olaylarının (örneğin kuraklık, sel ve fırtına) artışı, enerji altyapılarının dayanıklılığını sınamaktadır (IPCC, 2022, s. 16). Bu durumda yerelden üretilebilen, düşük karbonlu enerji çözümleri, daha istikrarlı ve dirençli bir ekonomi inşa etmek adına kilit rol üstlenmektedir. Yenilenebilir kaynaklara geçiş, aynı zamanda enerji yoksulluğuyla mücadele için de önemli fırsatlar sunar; kırsal bölgelerde güneş ve rüzgâr enerjisi odaklı mikro-şebekeler, elektriğe erişimi olmayan toplulukların enerji ihtiyaçlarını düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir şekilde karşılayabilir (IRENA, 2023, s. 7).

Elektrikli araçların (EV) yaygınlaşması, yenilenebilir enerjinin etkin kullanımını destekleyen bir diğer önemli boyuttur. İçten yanmalı motorlu araçlar fosil yakıt kullanımına ve egzoz emisyonlarına bağılıyken, elektrikli araçlar doğrudan egzoz emisyonu üretmemekte, böylece kentsel hava kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Mozafar, vd., 2018, s. 189). Ancak elektrikli araçların gerçek anlamda düşük karbonlu bir çözüm hâline gelebilmesi için, şarj altyapısında kullanılan elektriğin de yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi gereklidir (Stern, 2018, s. 13). Örneğin, rüzgâr ve güneş enerjisinin entegre edildiği akıllı şebeke sistemleri sayesinde, araçların şarjı talep yoğunluğunun düşük olduğu saatlerde yenilenebilir

enerji fazlasından sağlanarak hem elektrik maliyetleri düşürülmekte hem de karbon salımı azaltılmaktadır (NREL, 2021, s. 12).

Ayrıca, elektrikli araç batarya teknolojilerindeki gelişmeler, enerji depolama kapasitesinin artmasıyla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimdeki dalgalanmalarına karşı bir denge unsuru görevi üstlenebilir (IRENA, 2023, s. 9). Özellikle ikinci el EV bataryalarının istasyon düzeyinde veya konutlarda yeniden kullanımı (battery second life) konsepti, sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi ilkelerini destekleyen yeni bir iş modeli olarak karşımıza çıkmaktadır (World Bank, 2022, s. 23). Bu sayede yenilenebilir enerji üretiminin fazla olduğu saatlerde bataryalar dolmakta, enerji talebinin yüksek olduğu anlarda ise sisteme geri besleme yapılarak şebeke dengesi korunmaktadır (NREL, 2021, s. 13).

Bununla birlikte, yenilenebilir enerji dönüşümünün başarılı olabilmesi için finansman, politika tasarımı ve teknolojik kapasite gibi unsurların birlikte ele alınması gerekmektedir. Özellikle hükümetlerin uygulayacağı vergi teşvikleri, karbon fiyatlandırma mekanizmaları veya sübvansiyonlar, yatırımcıların temiz enerji projelerine ilgisini artırmakta ve özel sektör-kamu iş birliğini güçlendirmektedir (Goulder & Schein, 2013, s. 40). AR-GE faaliyetleri, yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve yerli imalat kapasitesinin büyümesi ise uzun vadede yenilenebilir enerji ekipmanlarının maliyetlerini daha da aşağı çekebilir (Boyle, 2019, s. 25). Ayrıca, enerji depolama ve akıllı şebeke uygulamaları sayesinde, yenilenebilir kaynakların üretim dalgalanmalarının yönetimi kolaylaşarak enerji arz istikrarı sağlanabilmektedir (NREL, 2021, s. 11).

Yerelde güneş panelleri, rüzgâr türbinleri veya biyokütle tesisleri kurmak hem karbon ayak izini küçültür hem de yerel ekonomileri canlı tutmaktadır. Örneğin, tarımsal atıklar veya orman ürünlerinden yararlanan biyokütle santralleri, çiftçiler ve yerel işletmeler için ek gelir kaynakları yaratırken, atık yönetimi süreçlerini de iyileştirmektedir (IRENA, 2023, s. 9). Hidroelektrik santraller, istikrarlı bir üretim profili sunarak baz yük kaynağı olarak öne çıksa da, baraj inşalarının ekosistem üzerindeki muhtemel olumsuz etkileri nedeniyle proje planlamaları titizlikle yapılmaktadır (World Bank, 2022, s. 21). Jeotermal kaynaklar ise yüksek sıcaklıklı bölgelerde elektrik ve ısı üretimi için yıl boyu kesintisiz bir seçenek sunarak fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmaktadır (Meadows et al., 2004, s. 93).

1.5. Sürdürülebilir Kalkınma Nedir?

Sürdürülebilir kalkınma, bugünün ihtiyaçlarını gelecek kuşakların gereksinimlerini karşılama imkânına zarar vermeden giderme yaklaşımını temel alan, ekonomik büyüme ile çevresel ve sosyal faktörleri bütüncül biçimde değerlendiren bir kalkınma modelidir (Brundtland, 1987, s. 43). Bu yaklaşım, insan refahının sağlanmasında ekonomik, toplumsal ve çevresel boyutların birbirleriyle kopuk olarak değil, bir etkileşim içerisinde ele alınması gerektiğini savunmaktadır (WCED, 1987, s. 12). Geleneksel kalkınma politikalarının yarattığı çevre tahribatı, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve gelir dağılımı adaletsizliği gibi olgular, 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren sürdürülebilirlik düşüncesinin hem akademik hem de politik platformlarda giderek öne çıkmasına yol açmaktadır (Stiglitz, 2019, s. 38).

Sürdürülebilir kalkınma kavramının tarihsel kökenleri, 1972 yılında Stockholm’de düzenlenen Birleşmiş Milletler Çevre ve İnsan Konferansı’na kadar uzanmaktadır. Bu konferansta, çevre sorunlarının insan refahı ve kalkınma politikaları ile yakından ilişkili olduğu ilk kez uluslararası düzeyde güçlü biçimde vurgulanmıştır (UN, 1972, s. 3). Ancak sürdürülebilir kalkınmanın küresel ölçekte tanınması ve tanımlanması, büyük ölçüde 1987’de yayımlanan Brundtland Raporu (Ortak Geleceğimiz) ile gerçekleşmiştir. Brundtland Raporu, kalkınmanın salt ekonomik büyümeyle eşitlenemeyeceğini ve toplumsal refahın sağlanması için ekosistemlerin sürdürülebilirliğinin göz ardı edilemeyeceğini açıkça ortaya koymuştur (Brundtland, 1987, s. 45). 1992 yılında Rio’da düzenlenen BM Çevre ve Kalkınma Konferansı’nda (Rio Zirvesi) kabul edilen “Gündem 21” ise sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin yerelden küresele kadar çok katmanlı bir biçimde uygulanmasını öngören bir yol haritası sunmuştur (UN, 1992, s. 22).

Sürdürülebilir kalkınma, üç temel sütun üzerine inşa edilir: ekonomik, çevresel ve sosyal (Meadows, Randers & Meadows, 2004, s. 52). Ekonomik boyut, ülkelerin büyüme ve refah hedeflerini gözetirken, kaynakların verimli kullanımını ve uzun vadeli istikrarı önceler. Çevresel boyut, doğal kaynakların korunması, biyoçeşitliliğin sürdürülmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi kritik unsurları içerir (IPCC, 2022, s. 14). Sosyal boyut ise yoksullukla mücadele, gelir dağılımında adalet ve katılımcı yönetim gibi faktörleri ele alarak toplumsal kapsayıcılığı ve refahı güçlendirmeyi amaçlar (Sen, 1999, s. 18).

Küresel ölçekte yaygın biçimde kabul edilen bu çerçeve, 2000’li yıllarda Binyıl Kalkınma Hedefleri (Millennium Development Goals, MDGs) ve 2015 yılından

itibaren de Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (Sustainable Development Goals, SDGs) aracılığıyla somut politikalara dönüştürülmüştür (UNDP, 2019, s. 5). Örneğin, SDG 7 “Erişilebilir ve Temiz Enerji” başlığı, yenilenebilir kaynakların kullanımını ve enerji verimliliğini artırmayı öngörürken, SDG 13 “İklim Eylemi” iklim değişikliğiyle mücadelele vurgu yapmaktadır (UN, 2015, s. 14).

Sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada kritik öneme sahip konulardan biri de enerji dönüşümüdür. Fosil yakıtların yarattığı karbon emisyonları, küresel ısınma ve hava kirliliği gibi çevresel tehditleri tetiklediğinden, ülkeler daha temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek zorundadır (IRENA, 2023, s. 7). Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve jeotermal gibi yenilenebilir kaynakların kullanılması, hem sera gazı salımlarını azaltmakta hem de enerji arz güvenliği açısından avantajlar sunmaktadır (World Bank, 2022, s. 19). Aynı zamanda yerel düzeyde ekonomik fırsatlar yaratarak, kırsal kalkınma ve istihdam gibi sosyal boyutları da desteklemektedir (Meadows et al., 2004, s. 54).

Elektrikli araçlar (EV’ler) ise sürdürülebilir kalkınma ile doğrudan ilişkili olan ulaşım sektöründeki karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli açısından önem taşımaktadır. İçten yanmalı motorlu araçlar, fosil yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları nedeniyle iklim değişikliğine en çok katkı yapan sektörlerden birine hizmet ederken, elektrikli araçlar egzoz emisyonlarını önemli ölçüde sıfıra indirmektedir (Mozafar, vd., 2018, s. 192). Ancak elektrikli araçların gerçek anlamda düşük karbonlu bir seçenek hâline gelmesi, şarj altyapısının da yenilenebilir kaynaklardan sağlanan elektrikle beslenmesine bağlı olmaktadır (Stern, 2018, s. 9). Uygun politik düzenlemeler, ekonomik teşvikler ve AR-GE destekleriyle elektrikli araçların yaygınlaştırılması, hem büyük kentlerde hava kirliliğini azaltacak hem de enerji ithalat bağımlılığı yüksek ülkelerin döviz harcamalarını düşürerek sürdürülebilir kalkınma hedeflerine olumlu katkı yapacağı düşünülmektedir (Goulder & Schein, 2013, s. 37).

Sürdürülebilir kalkınmanın sağlanmasında, ülkelerin politik kararlılığı ve çok paydaşlı iş birliği büyük önem taşımaktadır. Kamu, özel sektör, sivil toplum kuruluşları ve akademik çevrelerin ortak çalışmalarıyla geliştirilen politikalar, enerji altyapısının yenilenmesi, çevre koruma mevzuatlarının hazırlanması ve sosyal politikaların iyileştirilmesi için sağlam temeller oluşturmaktadır (European Commission, 2021, s. 6). Örneğin, karbon fiyatlandırması veya emisyon ticaret sistemi gibi mekanizmalar, fosil yakıtların gerçek maliyetini yansıtmayı sağlayarak daha temiz teknolojilere geçişi teşvik etmektedir (Goulder & Schein, 2013, s. 39).

Elektrikli araçlar konusundaki gelişmeler de bu politik çerçevenin bir parçası olarak değerlendirilmelidir. Ulaşım sektörü, küresel CO₂ emisyonlarında önemli bir paya sahip olduğu için, içten yanmalı motorlu araçların yerini elektrikli araçların alması, sera gazı salımlarında belirgin düşüşü beraberinde getirebilmektedir (Mozafar, vd., 2018, s. 158). Dünya genelindeki trendler incelendiğinde, elektrikli araç satışlarının her yıl artış gösterdiği ve bu büyümenin özellikle Çin, Avrupa Birliği ve ABD gibi büyük pazarlarda yoğunlaştığı görülmektedir (NREL, 2021, s. 10). Bunların yanı sıra, şarj istasyonlarının yenilenebilir enerji kaynakları ile bütünleştirilmesi, sürdürülebilir kalkınmanın enerji ve ulaşım boyutları arasındaki sinerjiyi arttırmaktadır (IRENA, 2023, s. 9).

Sürdürülebilir kalkınma için atılan adımlar, kısa vadede yüksek yatırım maliyetlerini gerektirse de uzun vadede kamu sağlığından enerji güvenliğine, ekonomik çeşitliliğe kadar birçok alanda avantajlar sunmaktadır (World Bank, 2022, s. 21). Örneğin, enerji verimliliği projeleri, yenilenebilir enerjinin yaygınlaştırılması ve elektrikli araçların desteklenmesi, ülkelerin karbon ayak izini küçültürken ekonomik büyümeye de ivme kazandırabilir. Yerel ölçekte üretilen enerji, dışa bağımlılığı azaltarak döviz dengelerini iyileştirir ve rekabet gücünü artırmaktadır (Stiglitz, 2019, s. 39).

Bununla birlikte, sürdürülebilir kalkınma yaklaşımlarının başarılı olabilmesi için katılımcı yönetim modellerine ihtiyaç duyulur. Yasal çerçevelerin hazırlanması, finansman kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve teknolojik inovasyonun teşvik edilmesi, ancak şeffaf, hesap verebilir ve kapsayıcı bir süreçle mümkün kılınabilir (UNDP, 2019, s. 9). Sosyal adalet, cinsiyet eşitliği ve yerel toplulukların sürece dâhil edilmesi gibi unsurlar, sürdürülebilir kalkınma politikalarının temel taşları olarak değerlendirilmektedir (Sen, 1999, s. 20).

Sonuç olarak, sürdürülebilir kalkınma, doğayı ve toplumu sadece bugünün değil, geleceğin de ihtiyaçlarını düşünerek kalkındırma amacını güden bütüncül bir çerçeve sunmaktadır. Enerji dönüşümü ve elektrikli araçlar, bu çerçevenin kritik bileşenleri arasında yer almaktadır. Fosil yakıtların neden olduğu çevresel ve toplumsal maliyetleri hafifletmek, enerji kaynaklarını çeşitlendirmek ve gelecek nesillere sağlıklı bir gezegen bırakmak için sürdürülebilir kalkınma ilkelerinin rehberliğine ihtiyaç vardır. Bu ilkeler, ülkelerin ekonomi, çevre ve toplumu dengeleyen politikaları tasarlayıp uygulamalarıyla hayata geçeceği düşünülmektedir (Meadows et al., 2004, s. 60).

1.6. Sürdürülebilir Kalkınmanın Tarihçesi

Sürdürülebilir kalkınma kavramının tarihçesi, insanlığın çevre ve kalkınma arasındaki ilişkileri yeniden düşünmeye başladığı 20. yüzyılın ikinci yarısından bu yana şekillenmiştir (Brundtland, 1987, s. 43). Bu dönemde hızla artan sanayileşme ve kentleşme, doğal kaynakların aşırı tüketimine ve çevre sorunlarının daha görünür hale gelmesine yol açmıştır (Meadows, Randers & Meadows, 2004, s. 50). Geleneksel kalkınma modelleri, ekonomik büyümeyi öncelikli hedef alarak uzun vadeli çevresel ve toplumsal maliyetleri yeterince hesaba katmamış, bu durum da “sürdürülebilirlik” fikrinin uluslararası gündemde yükselmesine neden olmuştur (Stiglitz, 2019, s. 42).

Tarihsel olarak bakıldığında, 1960’lar ve 1970’lerde çevre hareketlerinin güç kazanması, sürdürülebilir kalkınma kavramının ilk nüvelerini ortaya çıkarmıştır (Reid, 1995, s. 19). Özellikle 1962’de Rachel Carson’ın *Silent Spring* (Sessiz Bahar) adlı çalışmasıyla zirve yapan çevre bilinci, toplumlarda hava ve su kirliliği gibi sorunlara karşı tepkiyi artırmıştır (Carson, 1962, s. 87). Bu dönemde yapılan araştırmalar, ekonomik büyümenin yalnızca refah seviyesini yükseltmekle kalmadığını, aynı zamanda ekosistem üzerinde ağır bir tahribat yarattığını da göstermiştir (Meadows et al., 2004, s. 52).

1972’de Stockholm’de düzenlenen Birleşmiş Milletler Çevre ve İnsan Konferansı (Stockholm Konferansı), sürdürülebilir kalkınmanın mihenk taşlarından biri olarak kabul edilir (UN, 1972, s. 3). Bu konferans, çevrenin korunmasının uluslararası bir gündem haline gelmesinde belirleyici olmuş ve çevresel sorunların insan hakları ve kalkınmayla iç içe ele alınması gerektiğini öne çıkarmıştır (UN, 1972, s. 5). Aynı yıl yayımlanan *Limits to Growth* (Büyümenin Sınırları) raporu, nüfus artışı ve ekonomik büyümenin doğal kaynaklar üzerindeki yıkıcı etkilerine dikkat çekmiş, gelecek nesillerin refahını tehlikeye atmamak için büyümenin sınırlarının olduğuna vurgu yapmıştır (Meadows, Meadows, Randers & Behrens, 1972, s. 29).

1980’de Uluslararası Doğayı Koruma Birliği (IUCN), Dünya Kaynakları Enstitüsü (WRI) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) iş birliğiyle hazırlanan *Dünya Doğa Koruma Stratejisi*, doğal kaynakların kalkınma sürecinde korunmasını hedefleyen ilk kapsamlı uluslararası belgelerdendir (IUCN, 1980, s. 12). Bu strateji, kaynakların “sürdürülebilir kullanım” ilkesiyle yönetilmesi gerektiğini ileri sürmüş, doğanın sadece “ham madde deposu” değil, gelecek için vazgeçilmez bir yaşam kaynağı olduğu fikrini güçlendirmiştir (IUCN, 1980, s. 15).

Ancak sürdürülebilir kalkınma kavramının tam anlamıyla küresel politika söylemine yerleşmesi, 1987 yılında Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu (Brundtland Komisyonu) tarafından hazırlanan “Ortak Geleceğimiz” (Our Common Future) raporu ile gerçekleşmiştir (Brundtland, 1987, s. 43). Bu rapor, sürdürülebilir kalkınmayı “gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama olanaklarını tehlikeye atmadan, bugünün ihtiyaçlarını karşılayan kalkınma” şeklinde tanımlayarak, ekonomik büyüme ile çevre korumanın aynı sürecin parçaları olarak ele alınması gerektiğini savunmuştur (Brundtland, 1987, s. 45). Rapor, kalkınmanın sadece rakamsal büyüme (örneğin GSYH artışı) olmadığını; toplumsal refah, çevre kalitesi ve nesiller arası adalet gibi boyutları da içermesi gerektiğini vurgulamıştır (WCED, 1987, s. 12).

1992 yılında Rio de Janeiro’da düzenlenen Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı (Rio Zirvesi), sürdürülebilir kalkınma kavramını uluslararası hukuka ve politikalara daha somut bir şekilde yerleştirmiştir (UN, 1992, s. 7). Bu zirvede kabul edilen “Gündem 21” belgesi, ülkelerin kalkınma planlarında çevre koruma, sosyal adalet ve ekonomik büyüme arasındaki dengeyi nasıl kurabileceklerine dair kapsamlı bir yol haritası sunmuştur (UN, 1992, s. 10). Aynı Zirve’de imzaya açılan İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve Biyolojik Çeşitlilik Sözleşmesi gibi uluslararası antlaşmalar, sürdürülebilir kalkınmanın temel yasal ve kurumsal araçlarını oluşturmuşlardır (IPCC, 2022, s. 16).

2000 yılında, Birleşmiş Milletler Binyıl Zirvesi’nde kabul edilen Binyıl Kalkınma Hedefleri (Millennium Development Goals, MDGs), yoksulluğun azaltılması, eğitime erişimin artırılması, sağlık hizmetlerinin iyileştirilmesi ve çevre korumasının güçlendirilmesi gibi alanlarda somut hedefler belirleyerek sürdürülebilir kalkınma kavramını toplumsal boyutta daha da görünür kılmıştır (UNDP, 2019, s. 4). 2012 yılında Rio+20 Konferansı’nda ise “Sürdürülebilir Kalkınma İçin Küresel Ortaklık” çağrısı yapılmış, “Geleceğimiz” başlıklı sonuç belgesinde yeşil ekonomi, kurumsal yönetim ve yoksullukla mücadele konuları yeniden gündeme taşınmıştır (UN, 2012, s. 13).

2015 yılında kabul edilen Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (Sustainable Development Goals, SDGs), 2030 yılına kadar dünyadaki yoksulluğu sona erdirmeye, gezegeni koruma ve tüm insanların barış ve refah içinde yaşamasını sağlama gibi geniş kapsamlı bir vizyon ortaya koymuştur (UN, 2015, s. 14). SDG’ler, “Kimseyi Geride Bırakmama” (Leave No One Behind) ilkesiyle, sürdürülebilir kalkınmanın ancak

eşitsizlikleri gidererek, cinsiyet eşitliğini sağlayarak ve ekosistemi koruyarak gerçekleşebileceğini vurgulamaktadır (UNDP, 2019, s. 7).

Sürdürülebilir kalkınmanın tarihçesi, sadece uluslararası zirveler ve belgelerle sınırlı kalmamış, aynı zamanda teknolojik ilerleme ve toplumsal farkındalık düzeylerindeki değişimlerle de şekillenmiştir. Son yıllarda özellikle yenilenebilir enerji ve elektrikli araçlar gibi düşük karbon teknolojilerine yönelik yatırımlar, sürdürülebilir kalkınmayı somut uygulamalarla desteklemektedir (IRENA, 2023, s. 5). Ulaşım sektöründe içten yanmalı motorlu araçlardan elektrikli araçlara geçiş, fosil yakıt kullanımını azaltarak sera gazı emisyonlarına karşı önemli bir çözüm sunmaktadır (Mozafar, vd., 2018, s. 199).

Günümüzde sürdürülebilir kalkınma kavramı, başta ekonomi ve çevre politikaları olmak üzere kentsel planlama, sosyal refah, enerji yönetimi ve gıda güvenliği gibi farklı sektör ve disiplinlerde rehber ilke hâline gelmiştir (Stiglitz, 2019, s. 45). Hem küresel düzeyde hem de yerel ölçekte karar vericiler, kalkınma hedeflerini belirlerken artık “çevresel sürdürülebilirlik” ve “sosyal kapsayıcılık” gibi ilkeleri dikkate almak zorundadır (Meadows et al., 2004, s. 58). Şirketler ise kurumsal sosyal sorumluluk ve çevresel sorumluluk programlarıyla, işletme stratejilerini sürdürülebilir kalkınma çerçevesinde yeniden biçimlendirmektedir (Stern, 2018, s. 12).

Bu tarihsel süreçte yaşanan gelişmeler, sürdürülebilir kalkınma kavramının statik bir tanımdan ibaret olmadığını, sürekli değişen koşullara adapte olması gereken dinamik bir çerçeveyi ifade ettiğini göstermektedir (WCED, 1987, s. 12). İklim değişikliği, biyolojik çeşitliliğin kaybı ve sosyoekonomik eşitsizlikler gibi acil sorunlar, sürdürülebilir kalkınmanın günümüz ve gelecek nesiller için vazgeçilmez bir yaklaşım olduğunu kanıtlamaktadır. Dolayısıyla tarihsel bir perspektifle bakıldığında, sürdürülebilir kalkınma kavramı doğup olgunlaştıkça, insanlık için yeni ufuklar ve alternatif kalkınma yolları sunmaya devam etmektedir (UN, 2015, s. 16).

1.7. Sürdürülebilir Kalkınmanın Hedefleri

Günümüzde sürdürülebilir kalkınma hedefleri, Birleşmiş Milletler tarafından 2015 yılında benimsenen Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH’ler) aracılığıyla uluslararası kamuoyunda somutlaşmıştır (UN, 2015, s. 14). Bu kapsamlı hedefler toplam 17 başlık altında toplanmakta olup yoksulluğun ortadan kaldırılması, açlığın sona erdirilmesi, kaliteli eğitim, sağlıklı yaşam, toplumsal cinsiyet eşitliği ve iklim eylemi gibi geniş bir yelpazede ilerlemeye işaret etmektedir (UNDP, 2019, s. 7). Ayrıca

SKH 7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji) ile SKH 13 (İklim Eylemi), enerji dönüşümünün ve karbon emisyonlarının azaltılmasının sürdürülebilir kalkınma yolundaki önemine vurgu yapmaktadır (Meadows, Randers & Meadows, 2004, s. 60).

Bu hedeflerin gerçekleştirilmesi, devletlerin, özel sektörün ve sivil toplum kuruluşlarının iş birliğini gerektirir. Özellikle yenilenebilir enerjiye geçiş, su ve atık yönetiminin iyileştirilmesi ve toplumsal eşitsizliklerin giderilmesi gibi meseleler, SKH'lerin temel dayanak noktaları arasında yer almaktadır (IPCC, 2022, s. 16). Finansman, iyi yönetim ve teknolojik inovasyon, bu hedeflere ulaşmada belirleyici araçlar olarak öne çıkmaktadır (Goulder & Schein, 2013, s. 38).

1.8. Sürdürülebilir Kalkınmanın Geleceği

Sürdürülebilir kalkınmanın geleceği, büyük ölçüde teknolojik yenilikler, siyasi irade ve uluslararası iş birliğinin düzeyiyle belirlenecektir (Stiglitz, 2019, s. 46). İklim değişikliği, ekosistem kaybı ve artan sosyoekonomik eşitsizlikler, sürdürülebilir kalkınmayı gerek küresel gerekse yerel düzeyde acil bir gündem maddesi hâline getirmiştir (World Bank, 2022, s. 20). Özellikle karbon yoğun sektörlerde gerçekleşecek dönüşüm, enerji altyapısının yenilenmesi ve elektrikli ulaşım sistemlerinin yaygınlaşması, önümüzdeki dönemde sürdürülebilir kalkınmanın başlıca itici güçleri olacaktır (Meadows et al., 2004, s. 64).

Yeşil ekonomi ve döngüsel ekonomi gibi kavramlar, sürdürülebilir kalkınmanın gelecekteki yol haritasını şekillendiren yeni paradigmalardır. Atık yönetiminden yenilenebilir enerjiye, tarım uygulamalarından sanayide temiz üretime kadar birçok alanda çevresel maliyetlerin azaltılması, kaynak kullanım verimliliğinin artırılması ve toplumsal eşitliğin gözetilmesi, sürdürülebilir kalkınmanın sürekliliği açısından kritik unsurları oluşturur (Sen, 1999, s. 20). Elektrikli araçların yaygınlaşması bu çerçevede, ulaşım sektörünün dönüştürülmesi ve büyük şehirlerin hava kirliliğine çözüm bulması adına en somut adımlardan biridir (Mozafar, vd., 2018, s. 228).

Sürdürülebilir kalkınmanın geleceğinde, ulusal hükümetlerin, yerel yönetimlerin ve uluslararası kuruluşların ortak stratejiler geliştirmesi, iklim finansmanı ve enerji politikalarının koordineli biçimde yürütülmesi büyük önem taşımaktadır (IPCC, 2022, s. 18). Bu süreçte, enerji depolama teknolojileri, akıllı şebekeler ve enerji verimliliği uygulamaları, yenilenebilir kaynaklara geçişi hızlandıracak ve elektrikli araç altyapısının güçlü bir şekilde inşa edilmesine katkı

sunacaktır (Goulder & Schein, 2013, s. 40). Sonuç olarak, sürdürülebilir kalkınma anlayışı, gelecek nesillerin de yararlanabileceği bir dünya inşa etmenin temel koşulu hâline gelmiş durumdadır.



İKİNCİ BÖLÜM

YENİLENEBİLİR ENERJİ İLE SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA ARASINDAKİ İLİŞKİ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir kalkınmaya katkısı, literatürde uzun süredir üzerinde durulan temel konulardan biridir. Enerji arz güvenliği, çevresel koruma, iklim değişikliğiyle mücadele ve sosyal refah gibi pek çok boyut, sürdürülebilir kalkınma ilkelerine paralel şekilde yenilenebilir enerjinin önemini vurgulamaktadır. Bu bölümde, yenilenebilir enerjinin ekonomik, sosyal ve çevresel etkileri derinlemesine incelenecek ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri bağlamında tartışılmaktadır. Ayrıca mevcut politika ve uygulamalar, karşılaşılan zorluklar ve gelecek öngörüler de detaylandırılmaktadır

2.1. Ekonomik Etkiler

Yenilenebilir enerji kaynakları, sanayileşme ve kalkınma süreçlerinde fosil yakıtlara alternatif olarak büyük bir potansiyel sunmaktadır. Ekonomik açıdan ele alındığında, yenilenebilir enerji yatırımlarının başlangıçtaki yüksek maliyetlerine rağmen orta ve uzun vadede sağladığı avantajlar dikkat çekicidir. Diğer yandan, yenilenebilir enerji teknolojilerinin ilk yatırım maliyetleri, on yıl öncesine göre büyük ölçüde gerilemiştir. Örneğin Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) verilerine göre, 2010-2020 yılları arasında güneş fotovoltaik (PV) panellerin kurulum maliyeti yaklaşık %85 oranında düşüş göstermiştir (IRENA, 2020, s. 33-55). Sağladığı avantajların en başında enerji arzının güvenliği, istihdam olanakları, yerli üretim kapasitesi ve enerji faturalarının azaltılması gelmektedir.

2.1.1. Yatırım Maliyetleri ve Finansman

Yenilenebilir enerji teknolojilerinin kurulumu, fosil yakıtlara dayalı tesislere kıyasla genellikle daha yüksek ilk yatırım maliyeti gerektirebilmektedir (Nasrallah, vd., 2015). Bununla birlikte, teknoloji geliştikçe birim kurulum maliyetlerinin düştüğü gözlenmektedir. Örneğin, güneş panellerinin watt başına maliyeti son 20 yılda önemli ölçüde azalmaktadır (Kabir, Kumar, Kumar, Adelodun, & Kim, 2018, s. 102). Rüzgâr türbinleri, jeotermal sistemler ve biyokütle tesisleri için de benzer maliyet düşüş eğilimleri söz konusudur (Demirbaş, 2009, s. 7). Benzer şekilde, kara (onshore) rüzgâr türbini kurulum maliyetleri de aynı dönemde %55'in üzerinde azalmaktadır (GWEC,

2021, s. 20-22). Bu maliyet düşüşleri, özellikle gelişmekte olan ülkeler için yenilenebilir enerjiye geçişi daha cazip hâle getirmektedir. 2019 yılında dünyada gerçekleşen toplam yeni elektrik üretim kapasitesinin yaklaşık %72'si yenilenebilir kaynaklardan sağlanmıştır ve bu oranın büyük bölümünü güneş ve rüzgâr projeleri oluşturmaktadır (IEA, 2020, s. 45).

Yenilenebilir enerji projelerinin finansmanında kamu teşvikleri, özel sektör yatırımları, uluslararası kalkınma bankalarının düşük faizli kredileri ve yeşil tahvil (green bond) gibi finansal araçlar giderek yaygınlaşmaktadır (Sadorsky, 2009, s. 136). Hükümetlerin sağladığı alım garantileri (feed-in tariff) veya vergi teşvikleri de yatırımcılar açısından riski azaltmakta ve projelerin bankalar tarafından kredilendirilmesini kolaylaştırmaktadır (Jacobsson & Bergek, 2004, s. 213). Türkiye örneğine bakıldığında, 2021 itibarıyla güneş enerjisi kurulu gücü 7.816 MW'a, rüzgâr enerjisi kurulu gücü ise 10.750 MW'a ulaşmış olup (TÜREB, 2022, s. 15), bu kapasitelerin büyük bir kısmı son beş yılda gerçekleştirilen yatırımlarla sağlanmıştır. Yatırımların devam etmesi hâlinde 2030'a kadar rüzgâr ve güneşin toplam kurulu gücünün 30 GW'ı aşacağı öngörülmektedir (ETKB, 2021, s. 12).

2.1.2. İstihdam Yaratma Potansiyeli

Yenilenebilir enerji sektörü, kurulumdan işletmeye ve bakım onarıma kadar farklı uzmanlık düzeylerinde çok sayıda istihdam imkânı sunmaktadır (Kaldellis, Kapsali, & Katsanou, 2013, s. 98). Özellikle rüzgâr türbinlerinin montajı, güneş enerjisi panellerinin kurulumu ve jeotermal sahaların işletilmesi gibi teknik ve mühendislik bilgisi gerektiren alanlarda kalifiye iş gücüne duyulan ihtiyaç artmaktadır. Uluslararası yenilenebilir enerji ajansı raporuna göre, küresel ölçekte yenilenebilir enerji sektöründe istihdam edilen kişi sayısı 2012'de 5,7 milyon civarındayken 2020 yılında 11,5 milyona yükselmiştir (IRENA, 2020, s. 61). Buna ek olarak, yerel düzeyde istihdam artışı sağlanarak kırsal bölgelerdeki ekonomik hareketliliğe de katkıda bulunulabilmektedir (World Bank, 2020, s. 18). Bu istihdam artışları hem gelişmiş ülkelerde, hem de gelişmekte olan ülkelerde görülmektedir.

Örneğin rüzgâr enerjisi sektörü, her 1 MW kurulu güç başına ortalama 1-1,5 kişilik kalıcı istihdam oluşturabilirken; güneş enerjisi sektörü bu sayının üzerine çıkarak ortalama 3-4 kişilik istihdam olanağı sunmaktadır (European Commission, 2019, s. 27). Türkiye'de de rüzgâr ve güneş enerjisindeki büyüme sayesinde 2021'de bu sektörde yaklaşık 100 bin kişinin istihdam edildiği tahmin edilmektedir (TÜREB,

2022, s. 18). Özellikle yerli panel ve türbin üretimi, yan sanayii geliştirdiği gibi bakım-onarım hizmetlerinde de iş gücü ihtiyacını artırmaktadır.

Yenilenebilir enerji sektörünün iş gücü piyasasında yarattığı bu canlanma, nitelikli iş gücünün yetişmesini desteklediği gibi, kadınların ve gençlerin istihdama katılımını da artırarak sosyal kalkınmaya katkı sunar (Sovacool & Dworkin, 2015, s. 437). Özellikle düşük gelirli ve enerjiye erişimde sorun yaşayan bölgelerde, yerel toplulukları projelere dahil etme stratejileriyle yoksulluğun azaltılması hedeflenebilir (UN, 2015, s. 14).

2.1.3. Enerji Arz Güvenliği ve Dışa Bağımlılığın Azaltılması

Dünyada petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıt rezervleri belirli coğrafi bölgelerde yoğunlaşmış durumdadır. Bu durum, enerji ithalatına bağımlı ülkelerin ekonomik ve politik kırılganlığını artırmaktadır (Sadorsky, 2009, s. 140). Fosil yakıtlar konusunda dışa bağımlı olan ülkeler için, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi enerji arz güvenliğine de önemli katkı sağlamaktadır (Acar & Yıldız, 2016, s. 110). Rüzgâr, güneş, hidroelektrik ve jeotermal gibi kaynaklar, ülke sınırları içinde bulunabildiğinden ithalata duyulan ihtiyaç azalır (ETKB, 2020, s. 10). Enerji arz güvenliği hem ekonomik istikrar hem de ulusal güvenlik açısından stratejik öneme sahiptir (Sadorsky, 2009, s. 140). Bu doğrultuda, yenilenebilir kaynaklara dayalı enerji üretiminin artması, petrol ve doğalgaz fiyatlarındaki dalgalanmalardan daha az etkilenmeye olanak tanır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi, enerji ithalat faturalarını önemli ölçüde azaltabilir. Örneğin, Türkiye'nin 2020 yılı enerji ithalatı faturası 41 milyar ABD doları seviyesinde gerçekleşmiş; bu ithalatın büyük çoğunluğunu petrol ve doğalgaz oluşturmuştur (TÜİK, 2021, s. 44). Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yürütülen projeksiyonlara göre, rüzgâr ve güneş enerjisinin payının 2030'a kadar iki katına çıkarılması durumunda yıllık fosil yakıt ithalatında %15-20 aralığında bir azalma sağlanabileceği tahmin edilmektedir (ETKB, 2021, s. 15). Bu sayede enerji arz güvenliği de güçlendirilmiş olacaktır.

2.1.4. Yerli Üretim Kapasitesi ve Rekabet Gücü

Yenilenebilir enerji teknolojilerinde yerli üretimin geliştirilmesi, ülkelerin ihracat kapasitelerini artırma potansiyeline de sahip olmaktadır (Söderholm & Klaassen, 2007, s. 991). Örneğin, rüzgâr türbini bileşenlerinin veya güneş paneli

ekipmanlarının yerli üretimi, teknoloji transferine ve yenilikçi girişimlerin ortaya çıkmasına katkıda bulunmaktadır (Dincer, 2000, s. 161). Bu süreçte AR-GE faaliyetlerinin artırılması, üniversite-sanayi iş birliği, teknoparklar ve kuluçka merkezleri gibi yapılarla desteklenmektedir (Crespo, Paulo, & Vale, 2017, s. 192).

Ekonomik sürdürülebilirlik kapsamında, yenilenebilir enerji sektörünün tedarik zincirindeki tüm aşamalara (ham madde temini, üretim, pazarlama, montaj, bakım vb.) yönelik ulusal kapasitenin güçlendirilmesi, dış ticaret açığını azaltacağı gibi, küresel pazarda rekabetçiliği de artıracaktır (Oecd/IEA, 2021, s. 45). Bu da sürdürülebilir kalkınmanın ekonomik boyutuna doğrudan katkı yapmaktadır.

2.2. Sosyal Etkiler

Yenilenebilir enerji projelerinin, toplumun çeşitli kesimlerinde doğrudan ve dolaylı olarak çok sayıda sosyal etki yarattığı bilinmektedir (Sovacool & Dworkin, 2015, s. 437). Sosyal katılım, toplumsal cinsiyet eşitliği, enerjiye erişim ve yaşam kalitesi gibi faktörler, sürdürülebilir kalkınmanın sosyal boyutu içinde değerlendirilebilmektedir.

2.2.1. Enerjiye Erişim ve Kırsal Kalkınma

Kırsal bölgelerde elektrik şebekesinin erişemediği alanlar veya kesintilerin sık yaşandığı bölgeler için yenilenebilir enerji sistemleri, özellikle de mikro-şebeke (micro-grid) ve ada (off-grid) sistemleri, önemli bir çözüm sunmaktadır (UN, 2015, s. 20). Güneş panelleri, rüzgâr türbinleri veya biyokütle temelli jeneratörler, kırsal kesimde yaşayan toplulukların temel elektrik ihtiyacını karşılayabilmektedir (World Bank, 2020, s. 18). Bu durum, eğitim, sağlık ve iletişim gibi temel hizmetlerin kalitesini artırarak kırsal kalkınmayı desteklemektedir (IRENA, 2020, s. 62). Yenilenebilir enerji projeleriyle sağlanan kırsal kalkınma, aynı zamanda kırsaldan kente göçün azaltılmasına katkıda bulunabilmektedir (Deichmann, Meisner, Murray, & Wheeler, 2011, s. 43). Kırsal alanlarda sürdürülebilir gelir kaynaklarının ve istihdam olanaklarının ortaya çıkması, bölgesel kalkınma politikalarını güçlendirmektedir (Kaldellis et al., 2013, s. 101).

2.2.2. Toplumsal Katılım ve Paydaş Yönetimi

Yenilenebilir enerji projelerinin başarıya ulaşmasında, projenin tasarım ve uygulama aşamalarında yerel paydaşların dahil edilmesi büyük önem taşımaktadır (Wüstenhagen, Wolsink, & Bürer, 2007, s. 2686). Katılımcı yaklaşımlar; yerel halk,

sivil toplum kuruluşları ve belediyeler arasında iş birliği sağlanmasını kolaylaştırmaktadır. Böylece yenilenebilir enerji projelerine yönelik toplumsal kabul artarken, projelerle ilgili çatışmalar veya “NIMBY” (Not In My Back Yard) etkisi gibi direnç gösteren tutumlar da azalmaktadır (Aitken, 2010, s. 1839).

Yerel toplulukların projelerden doğrudan fayda sağlaması, örneğin kooperatifler şeklinde ortaklık yapılarının oluşturulması, projenin ekonomik getirisinden pay alınması veya eğitim programlarıyla yerel kapasitenin geliştirilmesi gibi mekanizmalarla mümkün hâle gelmektedir (Kalkbrenner & Roosen, 2016, s. 92). Bu da sosyal sürdürülebilirliği güçlendiren önemli bir unsurdur.

2.2.3. Toplumsal Eşitlik ve Kapsayıcılık

Enerjiye erişim, Birleşmiş Milletler tarafından temel insan hakları arasında değerlendirilmektedir (UN, 2015, s. 14). Yenilenebilir enerjinin yaygınlaşması, düşük gelirli topluluklar ve dezavantajlı bölgelerin temiz ve istikrarlı enerjiye daha kolay ulaşmasını sağlayabilir (Sovacool & Dworkin, 2015, s. 438). Ayrıca yenilenebilir enerji sektöründe kadınların ve gençlerin istihdam olanaklarının artırılması, toplumsal cinsiyet eşitliği ve genç işsizliğinin azaltılması açısından olumlu sonuçlar doğurmaktadır (Clancy, 2002, s. 44).

Bununla birlikte, her toplulukta aynı düzeyde teknolojiye erişim ve finansman imkânları bulunmadığı için, sosyal politika araçlarıyla yenilenebilir enerji projelerinde kapsayıcı bir modelin benimsenmesi gerekir (World Bank, 2020, s. 19). Örneğin, mikro krediler veya hibrit finansman modelleriyle kadınların kooperatif kurması ve güneş enerjisi projelerini yönetmesi gibi uygulamalar hayata geçirilebilir (Ortiz, 2021, s. 95).

2.3. Çevresel Etkiler

Yenilenebilir enerjinin sürdürülebilir kalkınma açısından en güçlü yönlerinden biri, çevre dostu özellikler taşımasıdır. Fosil yakıtların yakılmasıyla ortaya çıkan sera gazları ve hava kirliliği, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi sorunları derinleştirirken yenilenebilir kaynaklar, doğal ekosistemlere çok daha az zarar vermektedir (IPCC, 2018, s. 16).

2.3.1. Karbon Emisyonlarının Azaltılması

Küresel sera gazı emisyonlarının önemli bir kısmı enerji sektöründen kaynaklanmaktadır (IEA, 2019, s. 27). Bu nedenle, yenilenebilir kaynaklara geçişin

hızlandırılması, özellikle elektrik üretiminde karbon yoğun yakıtların kullanımını azaltarak iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir rol oynamaktadır (Panwar et al., 2011, s. 317). Güneş ve rüzgâr enerjisinin yanı sıra jeotermal ve hidroelektrik gibi kaynaklar da neredeyse sifıra yakın operasyonel emisyonu sahip olmaktadır (Holden, Linnerud, & Banister, 2014, s. 135).

Yenilenebilir enerji altyapısının inşası sırasında kullanılan malzemeler ve taşıma faaliyetleri de emisyon yaratabilmektedir; ancak yaşam döngüsü analizleri, bu tür emisyonların fosil yakıtlara dayalı santrallerin toplam emisyonuna kıyasla çok düşük kaldığını göstermektedir (Dincer, 2000, s. 158). Dolayısıyla yenilenebilir enerji sistemlerinin toplam karbon ayak izi, fosil yakıtlara göre belirgin ölçüde daha azdır (Spath & Mann, 2004, s. 18).

2.3.2. Doğal Kaynakların Korunması ve Kirliliğin Azaltılması

Enerji üretimi sürecinde su, toprak ve hava kirliliği en aza indirilerek ekolojik bütünlük korunabilmektedir (Demirbaş, 2008, s. 375). Fosil yakıt tesisleri, atık gazlar ve partikül madde salınımı gibi çevresel problemler yaratırken yenilenebilir enerji sistemleri, kurulum sonrasında oldukça temiz bir işletme aşamasına sahiptir. Rüzgâr ve güneş enerjisi tesisleri, kimyasal atık oluşturmadığı gibi su kullanımını da minimum düzeyde tutmaktadır (Dalton, Lockington, & Baldock, 2009, s. 212).

Öte yandan, her yenilenebilir enerji kaynağının kendine özgü ekolojik etkileri olabilir. Hidroelektrik santraller, baraj kurulumu nedeniyle habitat kaybına yol açabilmektedir (Çınar & Akgül, 2018, s. 66). Jeotermal enerji projelerinde ise reenjeksiyon (geri basma) sürecinin iyi yönetilmemesi hâlinde yeraltı sularının kimyasal bileşimi değişebilmektedir (Aksoy, 2018, s. 52). Bu nedenle, Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) süreçlerinin titizlikle uygulanması ve çevresel yönetim planlarının geliştirilmesi kritik öneme sahiptir (UNEP, 2020, s. 23).

2.3.3. Biyoçeşitlilik ve Ekosistem Hizmetleri

Biyoçeşitlilik, ekosistemlerin sağlığı ve sürdürülebilirliği açısından temel bir göstergedir (Griggs et al., 2013, s. 306). Yenilenebilir enerji projeleri, fosil yakıt projelerine göre genel olarak daha az alana ihtiyaç duymakla birlikte, rüzgâr türbinleri kuş göç yollarını etkileyebilir veya biyokütle projeleri tarımsal arazilerle rekabete girebilir (Sovacool, 2009, s. 3840). Dolayısıyla, proje planlama aşamasında jeolojik ve ekolojik etüdlerin yapılması, biyoçeşitlilik koruma önlemlerinin tasarlanması ve

uygulama sürecinde izlenmesi önem taşımaktadır (Li & Wang, 2020, s. 112). Ekosistem hizmetlerinin devamlılığını sağlamak, sürdürülebilir kalkınmanın önemli bir parçasıdır. Balıkçılık, su kalitesi, turizm ve rekreasyon faaliyetleri, özellikle hidroelektrik barajların inşa edildiği nehir havzalarında etkileneceğinden, paydaşlarla ortak bir yönetim planının oluşturulması gerekli olmaktadır (Sahin & Söylemez, 2019, s. 112).

2.4. Mevcut Politika ve Uygulamalar

Yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma ilişkisinin sağlıklı işlemesi için, ulusal ve uluslararası politika çerçevelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Gerek Birleşmiş Milletler (BM) nezdinde belirlenen uluslararası hedefler, gerekse ülkelerin kendi strateji belgeleri ve mevzuatı, yenilenebilir enerjinin gelişimini yönlendirmektedir (UN, 2015, s. 7).

2.4.1. Uluslararası Mevcut Çerçeveler

- **Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH):** 2015 yılında kabul edilen 17 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi arasında “Erişilebilir ve Temiz Enerji” (SKH 7) doğrudan yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılmasına vurgu yapmaktadır (UN, 2015, s. 11). Ayrıca “İklim Eylemi” (SKH 13) ve “Sorumlu Üretim ve Tüketim” (SKH 12) gibi diğer hedefler de yenilenebilir enerjiye geçişin önemini ortaya koyar.
- **Paris Anlaşması ve Ulusal Katkı Beyanları (NDCs):** Paris Anlaşması kapsamında ülkeler, sera gazı emisyonlarını azaltmak için Ulusal Katkı Beyanları’nı (Nationally Determined Contributions – NDCs) sunmaktadır. Yenilenebilir enerji, çoğu ülkenin emisyon azaltım stratejisinde temel araçlardan biridir (IPCC, 2018, s. 3).
- **Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve IRENA Girişimleri:** IEA ve Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), üye ülkelere politika önerileri, teknoloji yol haritaları ve finansman mekanizmaları konusunda rehberlik sağlar (IRENA, 2020, s. 29). Özellikle gelişmekte olan ülkeler için yenilenebilir enerji yatırım kılavuzları ve kapasite geliştirme programları yürütmektedirler (IEA, 2019, s. 27).

2.4.2. Türkiye’deki Mevcut Politikalar ve Stratejiler

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları açısından yüksek potansiyele sahip bir ülkedir (ETKB, 2020, s. 2). Son yıllarda çıkarılan yasalar ve yönetmeliklerle (örneğin, 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun) hukuki çerçeve güçlendirilmiştir. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması (YEKDEM) ile üreticilere alım garantisi sağlanması, yatırımcı güvenini artırmış ve kurulu gücü hızla yükseltmiştir (TÜREB, 2021, s. 7).

- **Rüzgâr ve Güneş İhaleleri (YEKA):** Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) ihaleleriyle büyük ölçekli rüzgâr ve güneş enerjisi projeleri desteklenmekte ve yerli ekipman üretimine teşvikler sağlanmaktadır (ETKB, 2020, s. 16). Bu uygulama hem teknolojik birikimi hem de sanayi kapasitesini artırmayı amaçlamaktadır.
- **Strateji Belgeleri:** T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), yayımladığı strateji belgelerinde yerli ve yenilenebilir kaynakların payını artırmaya yönelik hedeflere yer vermektedir (ETKB, 2020, s. 10). Bu kapsamda hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle gibi alanlarda da yatırımların sürdürülmesi öngörülmektedir (DSİ, 2019, s. 5).
- **Belediyelerin ve Yerel Yönetimlerin Rolü:** Son yıllarda büyükşehir belediyeleri, sürdürülebilir enerji eylem planları hazırlayarak güneş enerjili sokak aydınlatmaları, atık yönetimi ve jeotermal ısıtma gibi projeler geliştirmeye başlamıştır (Balcı, 2023. s. 230). Yereldeki başarının artması, kamu farkındalığı ve siyasal kararlılık düzeyine bağlıdır.

2.5. Karşılaşılan Zorluklar

Her ne kadar yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma ilişkisinde olumlu bir tablo ortaya konsa da uygulamada çeşitli zorluklar mevcuttur. Bu zorluklar; teknolojik sınırlamalar, finansman eksikliği, kurumsal ve yasal engeller, toplumsal direnç ve çevresel kaygılar gibi farklı boyutlarda ortaya çıkmaktadır (Rogers, Jalal, & Boyd, 2008, s. 64).

2.5.1. Teknolojik Sınırlamalar ve Enerji Depolama

Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi kesintili kaynaklar, sürekli ve istikrarlı bir enerji arzı gerektiren sistemlerde önemli bir meydan okuma olarak görülmektedir (Dincer, 2000, s. 160). Enerji depolama teknolojileri (lityum-iyon piller, pompalı hidroelektrik depolama, hidrojen üretimi vb.) henüz yüksek maliyetli ve uygulamada sınırlı kapasiteye sahiptir (IEA, 2019, s. 58). Bu durum, akıllı şebekeler (smart grids) ile talep yönetimi mekanizmalarının geliştirilmesini gerektirmektedir (GWEC, 2021, s. 34).

2.5.2. Finansman ve Yatırım Riski

Yenilenebilir enerji projeleri, uzun geri dönüş süreleri ve yüksek başlangıç maliyetleri nedeniyle yatırımcılar açısından riskli olarak değerlendirilebilmektedir (Sadorsky, 2009, s. 136). Özellikle gelişmekte olan ülkelerde döviz dalgalanmaları ve siyasi istikrarsızlık, finansmana erişimi zorlaştırabilmektedir (Özçelik & Mert, 2020, s. 109). Kamu teşviklerinin sürekliliği ve öngörülebilirliği sağlanamadığında, sektörde belirsizlik ortaya çıkar ve özel sektör yatırımları yavaşlamaktadır (Jacobsson & Bergek, 2004, s. 212).

2.5.3. Kurumsal ve Yasal Engeller

Enerji piyasasında regülasyonların sık sık değişmesi veya mevzuat altyapısının yetersiz kalması, yenilenebilir enerji projelerinin hayata geçirilmesini geciktirebilmektedir (Gunningham, 2013, s. 319). Proje ruhsatlandırma süreçlerinde birçok bakanlık ve kurumun yetkili olması, bürokrasiyi artırmakta ve karar alma süreçlerini karmaşıklatabilmektedir (ETKB, 2020, s. 26). Ayrıca yerel yönetimlerin yetki ve kaynak sınırlamaları, özellikle kırsal bölgelerdeki projelerin uygulanmasını zorlaştırmaktadır (Balci, 2023, s.230).

2.5.4. Toplumsal Direnç ve Farkındalık Eksikliği

Yenilenebilir enerji projelerine yönelik toplumsal kabul düzeyi, projelerin başarısı açısından kritik bir yere sahiptir (Wüstenhagen et al., 2007, s. 2688). Bazı bölgelerde, özellikle rüzgâr türbinlerinin estetik kaygılar veya gürültü gerekçesiyle istenmemesi (“NIMBY sendromu”) ciddi bir engel oluşturabilmektedir (Aitken, 2010, s. 1842). Toplumun bilgilendirilmesi, katılımcı planlama süreçlerinin işletilmesi ve yerel fayda mekanizmalarının geliştirilmesi, bu dirençle başa çıkmada etkili olabilmektedir (Kalkbrenner & Roosen, 2016, s. 93).

2.5.5. Çevresel Kaygılar ve Doğa Koruma

Yenilenebilir enerji projeleri her ne kadar çevre dostu olsa da, özellikle ekolojik hassasiyet taşıyan bölgelerde yeni sorunlar yaratabilmektedir (Çınar & Akgül, 2018, s. 70). Baraj projeleri nedeniyle yaşanan yerinden edilme, jeotermal projelerin tarım arazilerine veya içme suyu kaynaklarına etkisi gibi konular, yerel halk arasında tedirginlik oluşturabilmektedir (Aksoy, 2018, s. 52). Sürdürülebilir kalkınmanın temel ilkesi olan “çevresel bütünlük”, yalnızca projelerin karbon emisyonu azaltıcı yönüne değil, aynı zamanda ekosistemlerin korunmasına da odaklanmayı gerektirmektedir (Holden et al., 2014, s. 135).

2.6. Geleceğe Yönelik Öngörüler ve Stratejik Yaklaşımlar

Yenilenebilir enerji ile sürdürülebilir kalkınma arasındaki güçlü bağlantı, gelecek dönemde de enerji politikalarının merkezinde yer alması öngörülmektedir (Griggs et al., 2013, s. 306). İklim değişikliğiyle mücadelede ülkelerin 2050 veya 2060 gibi hedef yıllar için karbon nötr olma taahhütleri, yenilenebilir enerji teknolojilerinin hızla yaygınlaşacağını göstermektedir (IPCC, 2018, s. 16). Bu çerçevede, aşağıdaki stratejik yaklaşım ve öngörüler önem kazanmaktadır:

- 1. AR-GE ve Teknoloji Gelişimi**
Enerji depolama, akıllı şebekeler ve hidrojen teknolojileri alanında yapılacak AR-GE çalışmaları, yenilenebilir enerjinin sürekli ve yaygın kullanımını olanaklı hâle getireceği literatürde yerini almıştır (Dincer, 2000, s. 161). Özellikle “yeşil hidrojen” üretimiyle ağır sanayi, ulaştırma ve ısınma gibi alanlarda fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak mümkün olacağı düşünülmektedir (IRENA, 2020, s. 66).
- 2. Entegre Enerji Planlaması**
Elektrik, ısıtma, soğutma ve ulaştırma sektörlerinin bütünleşik bir yaklaşımla ele alınması, enerji verimliliğini artıracak ve kaynak kullanımını optimize edeceği düşünülmektedir (Rogers et al., 2008, s. 66). Örneğin, elektrikli araçların yaygınlaşması, ulaşım sektöründe karbon emisyonlarını azaltırken akıllı şebekeler yoluyla şarj istasyonlarının yönetilmesini kolaylaştırabileceği ifade edilmektedir (IEA, 2019, s. 59).
- 3. Yerel ve Bölgesel Yaklaşımlar**
Coğrafi ve iklimsel farklılıklar, her bölge için uygun yenilenebilir enerji türünün farklı olmasına yol açmaktadır. Bu nedenle ulusal politikaların yanı

sıra bölgesel düzeyde planlama ve uygulama yapmak büyük önem taşımaktadır (Oecd/IEA, 2021, s. 47). Örneğin, Ege Bölgesi'nde jeotermal potansiyel ön plana çıkarken İç Anadolu'da güneş enerjisi, Karadeniz'de ise hidroelektrik potansiyeli değerlendirilebilmektedir (ETKB, 2020, s. 16).

4. Uluslararası İş Birliği ve Kapasite Geliştirme

Yenilenebilir enerji projeleri, küresel sermaye, teknoloji transferi ve bilgi paylaşımını gerektirmektedir (UNDP, 2019, s. 27). Uluslararası iş birliği projeleri, gelişmekte olan ülkelerdeki finansman ve uzmanlık açığını kapatabilmektedir. Aynı zamanda çok taraflı kuruluşların (Dünya Bankası, Asya Kalkınma Bankası vb.) sunduğu kaynaklar, altyapı yatırımlarına önemli katkılar yapmaktadır (World Bank, 2020, s. 23).

5. Toplumsal Farkındalık ve Eğitim

Yenilenebilir enerji teknolojilerinin benimsenmesi ve sürdürülebilir kalkınma ilkelerinin toplumsal alana yayılması, ancak bilinçli birey ve toplulukların varlığıyla mümkündür (Wüstenhagen et al., 2007, s. 2687). Bu nedenle, lise ve üniversite müfredatlarında yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınmayla ilgili derslerin artırılması, kamuoyu kampanyalarının düzenlenmesi ve STK'ların desteklenmesi gerekmektedir (Clancy, 2002, s. 46).

6. Ekolojik Sınırlar ve Doğa Temelli Çözümler

Yenilenebilir enerji projeleri tasarlanırken ve uygulanırken, ekolojik sınırların göz önünde bulundurulması, biyolojik çeşitliliği koruyan, ekosistem hizmetlerini sürdüren yaklaşımların benimsenmesi gerekir (Holden et al., 2014, s. 136). Örneğin, “doğa-temelli çözümler” (nature-based solutions) kavramı kapsamında rüzgâr tarlalarının kuş göç yollarına etkisini minimize eden tasarımlar veya baraj inşaatında balık geçitlerinin planlanması gibi önlemler gündeme alınmalıdır (UNEP, 2020, s. 27).

Bu bölümde incelendiği üzere, yenilenebilir enerji ile sürdürülebilir kalkınma arasında çok boyutlu ve güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları; ekonomik büyüme, istihdam yaratma, enerji arz güvenliği, dışa bağımlılığın azaltılması gibi konularda önemli fırsatlar sunarken aynı zamanda toplumsal refaha ve çevresel korumaya da katkıda bulunmaktadır. Ancak bu ilişkinin olumlu etkilerini maksimize etmek ve karşılaşılan engelleri aşmak için kapsamlı politika tasarımları, kurumsal altyapı iyileştirmeleri ve toplumsal katılım mekanizmalarının güçlendirilmesi kaçınılmazdır (Pearce & Turner, 1990, s. 25).

Özellikle iklim değışikliğı gerçeğı göz önüne alındığında, fosil yakıtlara dayalı enerji sistemlerinin hızla dönüştürölmesi acil bir ihtiyaç hâline gelmiştir (IPCC, 2018, s. 2). Bu doğrultuda yenilenebilir enerji teknolojilerindeki hızlı gelişme, maliyetlerin düşmesi ve artan toplumsal farkındalık, gelecekte sürdüröllebilir kalkınma hedeflerine ulaşmayı mümkün kılabilir. Türkiye özelinde bakıldığında, yenilenebilir enerji potansiyelinin değerlendirilmesi ve sektörün daha da gelişmesi, hem ülkenin enerjide dışa bağımlılığını azaltacak hem de sürdüröllebilir kalkınma açısından olumlu sonuçlar doğuracaktır (ETKB, 2020, s. 20). Sonuç olarak, yenilenebilir enerji ve sürdüröllebilir kalkınma arasındaki ilişki, yalnızca teknik veya ekonomik bir konu olmayıp aynı zamanda toplumsal dönüşümü de gerektiren bir süreçtir. Bu süreçte çok paydaşlı iş birliği, iyi yönetim (good governance) ve kapsayıcı politikalar belirleyici rol oynayacaktır (UN, 2015, s. 14). Mevcut fırsat ve engeller dikkate alınarak hazırlanacak stratejiler, geleceğın düşük karbonlu ve kapsayıcı ekonomik düzeninin inşasında yenilenebilir enerjiyi temel bir itici güç hâline getirebilecektir.

2.7. Yenilenebilir enerjinin Sürdüröllebilir Kalkınmaya Etkisine Bir Örnek: Elektrikli Araçlar

Fosil yakıtların yoğun kullanımına dayalı ekonomik büyüme modeli, 20. yüzyılda pek çok ülkenin kalkınmasına katkı sağlamakla birlikte çevre kirliliğı, küresel ısınma ve sürdürölmez kaynak tüketimi gibi kritik sorunları da beraberinde getirmiştir (Sims et al., 2014, s. 509). Özellikle ulaşırma sektörü, petrol türevi yakıtların ana tüketicilerinden biri olarak hem sera gazı emisyonlarının hem de yerel hava kirliliğının önemli kaynaklarından kabul edilmektedir (IEA, 2022, s. 8). Bu noktada, elektrikli araçlar (EA), daha düşük veya sırfa yakın emisyon değerleriyle temiz ulaşım politikasının merkezine yerleşmeye başlamıştır (Tören ve Mollahasanoğlu, 2022, s. 1083). Hem enerji verimliliğı hem de çevre dostu özellikleri sayesinde, elektrikli araçlar pek çok ülkede teşvik, vergi indirimi ve altyapı yatırımları ile desteklenmektedir (Erdil & Mert, 2021, s. 22). Bunun en temel nedeni, ulaşım sektöründe karbon ayak izinin düşürölmesi ve sürdüröllebilir kalkınma hedeflerine daha hızlı yaklaşabilmektir. Bu başlık altında, elektrikli araçların tanımı ve tarihsel arka planından başlayarak, günümüzdeki pazar durumunu, sürdüröllebilir kalkınma kavramıyla bağılantısını ve ulusal/uluslararası politikaları ayrıntılı biçimde tartışmaktadır. Bu başlıktaki amaç hem endüstri hem de toplum düzeyinde dönüşüm

yaratan bu teknolojik gelişimi, bilimsel bulgular ve somut veriler eşliğinde ortaya koymaktır.

2.7.1 Elektrikli Araçların Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

Elektrikli araçlar, hareket enerjisini birincil olarak elektrikten sağlayan ve içten yanmalı motor yerine elektrik motoru kullanan otomobil, motosiklet, otobüs veya kamyon gibi tüm kara taşıtlarını kapsamaktadır (Chan, 2007, s. 24). Bu araçlarda batarya, elektrik motoru, güç kontrol üniteleri ve dönüştürücüler gibi bileşenler, klasik otomobillerdeki benzinli/dizel motor ve yakıt deposu sisteminin yerini alır (Larminie & Lowry, 2012, s. 14). Elektrikli araçlar, tam elektrikli araç (BEV), hibrit elektrikli araç (HEV) ve şarj edilebilir hibrit araç (PHEV) gibi alt kategorilere ayrılır. Tam elektrikli araçlar, enerjiyi sadece bataryadan alırken, hibrit araçlar içten yanmalı motora da sahiptir (Erdil & Mert, 2021, s. 22). Şarj edilebilir hibritlerde ise harici bir güç kaynağından batarya doldurmak mümkündür (Chan, 2007, s. 24).

Elektrikli araçların tarihi, 19. yüzyılın ortalarına kadar uzanmaktadır (Anderson & Anderson, 2010, s. 31). 1830'lu yıllarda geliştirilen ilk prototipler, dönemin teknolojik yetersizlikleri ve petrolün bulunabilirliğinin artması nedeniyle geniş çapta yaygınlaşmamıştır. 1900'lerin başında ise, içten yanmalı motorlu araçların seri üretime geçmesi, petrolün ucuz olması ve menzil avantajı gibi nedenlerle elektrikli modeller geri planda kalmıştır (Sperling, 2018, s. 45). 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizleri, alternatif yakıt ve enerji kaynaklarına yönelimi hızlandırmış, bu kapsamda elektrikli araç AR-GE faaliyetleri ivme kazanmıştır (Nasrallah, vd., 2015). 1990'lardan itibaren ise çevre bilincinin artması, baca gazı ve emisyon regülasyonları, batarya teknolojilerindeki gelişmeler ve devlet teşvikleri, elektrikli araçların daha fazla görünürlük kazanmasına yol açmıştır (BloombergNEF, 2023, s. 4). Günümüzde, özellikle lityum-iyon bataryaların fiyatlarındaki düşüş ve şarj altyapısının yaygınlaşması, elektrikli araç piyasasının hızlı büyümesinde belirleyici rol oynamaktadır (IEA, 2022, s. 10).

2.7.2. Elektrikli Araç Çeşitleri ve Teknolojik Bileşenler

Elektrikli araçlar, genel anlamda üç ana sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar,

1. **Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV):** İçten yanmalı motor ile elektrik motorunu bir arada barındırır. Harici şarj girişi yoktur; frenleme enerjisi geri kazanımı ve motor yük yönetimi gibi yöntemlerle batarya şarj edilir (Chan, 2007, s. 27).

2. **Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEV):** Hem içten yanmalı motora hem de harici bir güç kaynağından şarj edilebilen bir bataryaya sahiptir (Erdil & Mert, 2021, s. 27). Kısa mesafelerde elektrik modunda yol alabilir; menzil endişesi yaşayan kullanıcılar için geçiş teknolojisi olarak görülür.
3. **Tam Elektrikli Araçlar (BEV):** Enerjiyi yalnızca bataryadan alır ve egzoz emisyonu sıfıra yakındır. Elektrik motoru dışında herhangi bir yanmalı motoru olmadığı için sessiz ve yüksek verimli çalışır (Larminie & Lowry, 2012, s. 19).

Temel Teknolojik Bileşenler

- **Batarya Sistemleri:** Lityum-iyon, lityum-demir fosfat gibi kimyasal yapılara sahiptir. Verimlilikleri ve enerji yoğunlukları her geçen gün artmaktadır (Nykqvist & Nilsson, 2015, s. 329).
- **Elektrik Motoru:** Konvansiyonel motorlardan çok daha yüksek tork ve verimlilik sağlar (Chan, 2007, s. 29).
- **Güç Kontrol Ünitesi (Inverter/Converter):** Batarya gerilimini motorun ihtiyaç duyduğu forma dönüştürür, fren enerjisi geri kazanımı gibi süreçleri de yönetir (Erdil & Mert, 2021, s. 30).

Elektrikli araçların teknolojik altyapısı, hızla gelişmekte ve batarya kapasitesi, şarj süresi, menzil gibi kritik konularda sürekli yeni iyileştirmeler yapılmaktadır (Ou et al., 2021, s. 55).

2.7.3. Elektrikli Araç Pazarının Mevcut Durumu

Elektrikli araç pazarı, son 10 yılda çarpıcı bir büyüme göstermiştir. 2015 yılında dünya genelinde satılan elektrikli otomobil sayısı yaklaşık 550 bin civarındayken, 2022'de bu rakamın 7,8 milyona çıktığı tahmin edilmektedir (IEA, 2022, s. 10). Böylece, elektrikli araçların küresel pazar payı %0,8'den %11,5 düzeyine yükselmiştir. Özellikle Çin, Avrupa ve ABD, bu alanda lider pazarlar olarak öne çıkmaktadır (BloombergNEF, 2023, s. 5). Çin, hem üretim kapasiteleri hem de yerli tüketim bakımından en büyük elektrikli araç ekosistemine sahiptir. Avrupa Birliği ülkeleri ise sıkı emisyon hedefleri ve güçlü teşvik politikalarıyla elektrikli araçların benimsenmesini hızlandırmaktadır (EEA, 2021, s. 14).

Küresel ölçekte bu hızlı büyümenin arkasında, aşağıdaki faktörler yer almaktadır:

1. **Devlet Teşvikleri ve Vergi Avantajları:** Pek çok ülkede elektrikli araçlar için vergi muafiyetleri, satın alım destekleri ve düşük veya ücretsiz otopark uygulamaları uygulanmaktadır (Sperling, 2018, s. 52).

2. **Teknolojik İlerlemeler:** Batarya maliyetlerinin düşmesi ve şarj altyapısının yaygınlaşması, tüketicilerin elektrikli araçlara olan güvenini artırmıştır (Nykqvist & Nilsson, 2015, s. 330).
3. **Çevre Bilinci ve Markaların Stratejik Yaklaşımı:** Büyük otomotiv üreticileri, elektrikli modellerini hızla pazara sunarak **karbonsuzlaşma** stratejilerine yatırım yapmaktadır (Nasrallah, vd., 2015).

Önümüzdeki dönemde, **2030–2035** periyodunda birçok ülkenin içten yanmalı araç satışlarını sınırlandırması veya yasaklaması beklenmekte; bu durum elektrikli araç pazarını daha da canlı tutacağı düşünülmektedir (IEA, 2022, s. 11).

2.7.4 Elektrikli Araçların Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ile İlişkisi

Birleşmiş Milletler'in **Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA)**, 2015 yılında belirlenen 17 küresel hedef aracılığıyla sosyal, ekonomik ve çevresel dönüşümün gerçekleşmesini amaçlar (UN, 2015, s. 2). Elektrikli araçlar, bu hedeflerden özellikle aşağıdakilerle yakından ilişkilidir:

- **SKA 7: Erişilebilir ve Temiz Enerji**

Elektrikli araçlar, **fosil yakıt tüketimini** önemli ölçüde azaltarak yenilenebilir enerji kaynaklarının ulaşım sektörüne entegrasyonunu kolaylaştırır (IEA, 2022, s. 12).

- **SKA 11: Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar**

Emisyon ve gürültü kirliliğinin azalması, kent merkezlerinde **yaşam kalitesini** yükseltir (EEA, 2021, s. 8).

- **SKA 13: İklim Eylemi**

Karbon salımlarının azaltılmasında en hızlı sonucu sağlayan teknolojilerden biri olarak, küresel ısınma ile mücadeleyi destekler (Sims et al., 2014, s. 512).

- **SKA 8: İnsana Yakışır İş ve Ekonomik Büyüme**

Batarya üretimi, şarj altyapısı, yazılım ve veri analitiği gibi yeni sektörlerde istihdam yaratır (KPMG, 2021, s. 9).

Elektrikli araçlar, bu hedeflere ulaşma yolunda önemli bir kaldıraç işlevi görebilir. Ancak gerçek bir sürdürülebilirlik sağlamak için, elektrikli araçların kullanılacağı enerjinin de temiz kaynaklardan üretilmesi, batarya geri dönüşümünün yaygınlaştırılması ve toplumsal farkındalığın artırılması gereklidir (Ou et al., 2021, s. 58).

2.7.5. Sürdürülebilir Ulaşım Politikaları ve Elektrikli Araçlar

Sürdürülebilir ulaşım, çevresel, ekonomik ve sosyal faktörlerin birlikte gözetildiği bir ulaşım planlamasını ifade eder (Goldman & Gorham, 2006, s. 267). Bu anlayış, ulaşım altyapısının hem bugünün hem de geleceğin ihtiyaçlarını karşılarken, doğal kaynakları korumayı ve toplum refahını artırmayı amaçlar. Elektrikli araçlar, karbonsuzlaşma hedefleri doğrultusunda sürdürülebilir ulaşım politikalarının merkezinde yer almaya başlamıştır (Erdil & Mert, 2021, s. 40). Bazı ülkeler, içten yanmalı motorlu araç satışlarını kademeli olarak yasaklama planları açıklayarak (örn. Norveç 2025, İngiltere 2030), şehir içi emisyonlarının hızla azaltılmasını hedeflemektedir (IEA, 2022, s. 13).

Ayrıca toplu taşımada elektrikli otobüs, tramvay ve metrobüs gibi araçların yaygınlaştırılması, şehir hava kalitesini yükseltmekte ve fosil yakıt tüketimini önemli ölçüde düşürmektedir (Nasrallah, vd., 2015). Bunun yanı sıra, paylaşımlı mobilite (car-sharing, ride-sharing) uygulamaları, trafik yoğunluğunu azaltmak için alternatif çözümler sunarken, elektrikli araç filosu sayesinde karbon ayak izinin minimize edilmesine katkıda bulunur (Sperling, 2018, s. 55). Sürdürülebilir ulaşım politikalarında kamu ve özel sektör iş birliği son derece kritiktir. Şarj altyapısının yaygınlaştırılması, tüketici teşvikleri, AR-GE yatırımlarının desteklenmesi gibi uygulamalar, elektrikli araçların ulaşım sistemine entegrasyonunu hızlandırarak çevresel ve ekonomik kazanımları artırır (Tören ve Mollahasanoğlu, 2022, s. 1085).

Elektrikli araçların sürdürülebilir kalkınma ve yenilenebilir enerji açısından etkilerinin daha derinlemesine incelenebilmesi adına bu çalışmada literatürde en çok yer verilen analiz yöntemlerinden Swot Analizi tercih edilmiştir. Swot analizinin kavramsal ve kuramsal çerçevesi bu bölümün son başlığında yer almaktadır.

2.8. Swot Analizi Nedir?

Stratejik yönetim disiplini, örgütlerin iç ve dış çevrelerini değerlendirerek uzun vadeli amaçlar belirlemesini ve bu amaçlara ulaşmak için gerekli kaynak planlamasını yapmasını öngörür (Hill & Jones, 2021, s. 25; Özdemir, 2021, s. 14). Bu doğrultuda, karar verme süreçlerinde kullanılan en temel araçlardan biri SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) Analizi olarak kabul edilir. SWOT analizi, kurumların ya da projelerin mevcut durumunu hem iç hem de dış faktörler açısından bütüncül bir yaklaşımla incelemelerine olanak tanır (Kotler & Keller, 2021, s. 65; Tekin, 2022, s. 33).

SWOT analizinin ilk kez ne zaman ve kim tarafından geliştirildiğine dair farklı görüşler öne sürülmekle birlikte, stratejik planlama literatüründe 1960'lı yıllardan bu yana kullanıldığı bilinmektedir (Wheelen & Hunger, 2022, s. 34; Ansoff, 1965, s. 22). Bu analiz, kurumların rekabet edebilirliğini artırmak ve sürdürülebilir bir stratejik planlama anlayışı geliştirmek için sıklıkla başvurulan yöntemlerden biridir (Dess, McNamara & Eisner, 2020, s. 78; Mucuk, 2019, s. 47).

Bu çalışmanın amacı, SWOT analizini akademik bir çerçevede içinde detaylandırmak, kuramsal temellerini ve uygulama aşamalarını ortaya koymaktır. Bu kapsamda öncelikle SWOT analizinin tanımı yapılacak, ardından her bir ögesi (Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar ve Tehditler) ayrı alt başlıklar altında incelenecektir (Bryson, 2018, s. 49; Tekin, 2022, s. 38). Daha sonra analiz yönteminin tarihsel gelişimine ve teorik temellerine değinilecek; ayrıca uygulama aşamaları ve örnek durum analizleri sunulacaktır. Son olarak SWOT analizinin avantajları, dezavantajları ve geleceğe dönük öngörüler tartışılarak çalışma tamamlanacaktır.

2.8.1. SWOT Analizinin Tanımı ve Önemi

SWOT kısaltması şu dört temel bileşene dayanır: Strengths (Güçlü Yönler), Weaknesses (Zayıf Yönler), Opportunities (Fırsatlar) ve Threats (Tehditler) (Kotler & Armstrong, 2020, s. 112). Bu kavramlar, kurumun hem iç hem de dış çevresinden kaynaklanan durum ve koşulları ifade eder. Stratejik yönetim uzmanlarına göre, başarılı bir stratejik planlama süreci, örgütlerin kendi güçlü ve zayıf yönlerini tanımlaması, ardından dış çevredeki fırsat ve tehdit unsurlarını dikkatlice değerlendirmesi ile başlar (David, 2019, s. 23; Özdemir, 2021, s. 18).

SWOT analizinin önemini şu şekilde özetlemek mümkündür (Johnson, Scholes & Whittington, 2020, s. 57; Tekin, 2022, s. 39):

1. **Bütüncül Bakış:** İç ve dış çevre faktörlerini tek bir çerçevede toplar.
2. **Stratejik Karar Desteği:** Yönetim kademelerinin bilgiye dayalı kararlar vermesine katkı sunar.
3. **Kaynak Yönetimi:** Kurumun mevcut kaynaklarını en verimli şekilde kullanabilmesine yol gösterir.
4. **Stratejik Uyum:** Kurumsal vizyon, misyon ve hedeflerin dış çevre koşullarıyla uyumlu hale getirilmesinde rehber olur.

Örneğin bir işletme, güçlü yönleri arasında “yüksek teknolojik altyapı” veya “kalifiye insan kaynağı” gibi faktörleri sıralayabilir (Grant, 2021, s. 39). Ancak bu

güçlü yönlerin sürdürülebilir bir rekabet avantajı yaratması, dış çevreden gelebilecek tehditlere ne ölçüde hazırlanıldığına ve fırsatların ne kadar etkin değerlendirildiğine de bağlıdır (Barney & Hesterly, 2019, s. 16).

2.8.2. SWOT Analizinin Unsurları

Bu bölümde, SWOT analizinin anlaşılması sebebiyle ana başlıklarına ait dört temel unsura ayrı alt başlıklar altında yer verilmektedir.

2.8.2.1. Güçlü Yönler (Strengths)

Güçlü yönler, örgütü veya projeyi rakiplerine kıyasla avantajlı kılan, rekabet üstünlüğü elde etmesini sağlayan iç faktörlerdir. Örneğin, köklü bir kurumsal itibar, sağlam bir finansal yapı, nitelikli insan kaynağı veya yenilikçi AR-GE kapasitesi güçlü yönlerdir (Porter, 1998, s. 74; Mucuk, 2019, s. 52). Güçlü yönlerin doğru tespit edilmesi, örgütün stratejik planlarının inşa edileceği en önemli dayanak noktasıdır (Thompson, Strickland & Gamble, 2021, s. 91; Tekin, 2022, s. 44).

Güçlü yönlerin analizinde şu sorulara yanıt aranır (Barney, 1991, s. 100):

- “Kurumun rakiplerine göre en belirgin avantajları nelerdir?”
- “Hangi kaynak ve yetkinlikler, kurumu pazarda rekabetçi kılmaktadır?”

Bu sorulara verilen yanıtlar, örgütün var olan potansiyelini en iyi şekilde kullanmak için atılması gereken adımların da temelini oluşturur (Wheelen & Hunger, 2022, s. 50).

2.8.2.2. Zayıf Yönler (Weaknesses)

Zayıf yönler, kurumun iç dinamiklerinden kaynaklanan ve rekabet gücünü azaltan faktörleri ifade eder. Bunlar, işletmenin kontrol edebileceği ancak iyileştirmesi veya gidermesi gereken durumlardır (David, 2019, s. 47). Örneğin, yetersiz sermaye, düşük marka bilinirliği, eğitim seviyesi düşük iş gücü ya da verimsiz organizasyon yapısı gibi unsurlar bu kapsama girer (Hill & Jones, 2021, s. 101; Özdemir, 2021, s. 23).

Zayıf yönlerin doğru şekilde teşhis edilmesi, kurumsal gelişim için kritik öneme sahiptir. Zira bu eksikliklerin zamanında tespit edilip üzerinde çalışılması, potansiyel fırsatların değerlendirilmesine de yardımcı olur (Johnson et al., 2020, s. 104).

2.8.2.3. Fırsatlar (Opportunities)

Fırsatlar, örgütün dış çevresinden gelen ve doğru şekilde değerlendirildiğinde rekabet avantajı yaratabilecek faktörlerdir (Kotler & Armstrong, 2020, s. 134; Özdemir, 2021, s. 26). Örneğin yeni bir teknolojik gelişme, tüketici eğilimlerinde olumlu bir değişim, pazar genişlemesi veya devlet teşvikleri gibi konuların tamamı fırsat olarak sınıflandırılabilir (Bryson, 2018, s. 72).

Fırsatların zamanında ve doğru şekilde tespiti, örgütlerin stratejik planlama sürecinde yenilikçi yaklaşımlar benimsemesini kolaylaştırır (Grant, 2021, s. 48). Bu bağlamda, fırsatlar genellikle PESTEL (Political, Economic, Sociocultural, Technological, Environmental, Legal) gibi çevresel analizlerle de ilişkilendirilerek incelenir (Wheelen & Hunger, 2022, s. 88).

2.8.2.4. Tehditler (Threats)

Tehditler, yine dış çevreden kaynaklanan ve örgütün rekabet gücünü zayıflatma potansiyeli taşıyan faktörlerdir (Hill & Jones, 2021, s. 113). Bunlar rakip firmaların agresif stratejileri, ekonomik krizler, teknolojik gerilik, yeni yasal düzenlemeler veya siyasi belirsizlikler olabilir (David, 2019, s. 53).

Tehditlerin önceden tespit edilmesi ve etkilerinin azaltılması, risk yönetiminin önemli bir parçasını oluşturur (Bryson, 2018, s. 79). Özellikle küreselleşen dünyada, tehditleri hem ulusal hem de uluslararası boyutlarıyla değerlendirmek stratejik planların başarısı açısından kritik önem taşır (Dess et al., 2020, s. 96).

2.8.3. Tarihsel Gelişim ve Teorik Temeller

SWOT analizinin kökenleri, 1960'lı yıllarda işletme ve yönetim literatüründe ortaya çıkan “durumsallık yaklaşımı” (contingency approach) ve “stratejik durum analizi” çalışmalarına dayanmaktadır. Bu dönemde, işletmelerin sadece iç kaynaklarını değil, aynı zamanda dış çevrenin getirdiği değişkenlikleri de göz önünde bulundurması gerektiği fikri yaygınlaşmıştır (Hill ve Jones, 2021, s. 110).

Teorik temeller açısından bakıldığında, SWOT analizi büyük ölçüde kaynak temelli yaklaşım (resource-based view, RBV) ve stratejik uygunluk (strategic fit) gibi kavramlarla ilişkilendirilir (Barney, 1991, s. 99; Özdemir, 2021, s. 29). Kaynak temelli yaklaşım, örgütlerin sürdürülebilir rekabet avantajını sahip oldukları değerli, nadir, taklit edilemez ve örgütsel olarak desteklenen (VRIO) kaynakları sayesinde elde

edebileceğini vurgular (Barney & Clark, 2007, s. 17; Tekin, 2022, s. 48). SWOT analizi, bu yaklaşımı somutlamak için pratik bir araç olarak işlev görür.

Diğer yandan, Porter'ın Beş Güç Modeli (Porter's Five Forces) ve PESTEL Analizi gibi çerçevelerle birlikte kullanıldığında, SWOT analizi daha bütüncül bir stratejik yönetim aracı haline gelir (Porter, 1998, s. 76). Bu yöntemlerin tamamı, örgütün iç ve dış çevresi arasındaki ilişkiyi derinlemesine inceleyerek stratejik planlama sürecine rehberlik eder (Thompson et al., 2021, s. 121).

2.8.4. SWOT Analizinin Uygulama Aşamaları

SWOT analizi uygulaması, genellikle beş temel aşamadan oluşur (David, 2019, s. 60; Özdemir, 2021, s. 31):

- **Veri Toplama:** Hem iç hem de dış çevreye dair detaylı bilgiler toplanır. İç çevre için finansal raporlar, personel verileri, AR-GE yetkinlikleri gibi dokümanlar; dış çevre içinse pazar araştırmaları, rakip analizi, sektör raporları ve makroekonomik veriler kullanılır (Hill & Jones, 2021, s. 135).
- **Analiz ve Sınıflandırma:** Toplanan veriler, dört kategoriden (Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar, Tehditler) birine yerleştirilerek sınıflandırılır (Kotler & Armstrong, 2020, s. 154).
- **Önceliklendirme:** Kategori içinde yer alan her faktörün önem düzeyi ve aciliyeti belirlenir (Grant, 2021, s. 63). Böylece kritik faktörlerle öncelikli olarak ilgilenmek mümkün olur.
- **Strateji Geliştirme:** SWOT analizindeki veriler ışığında stratejik yol haritası oluşturulur. Örneğin, güçlü yönlerin fırsatlarla birleştirilerek rekabet avantajı sağlanması (SO stratejisi) veya zayıf yönlerin tehditlerle çarpışmasını azaltacak adımların atılması (WT stratejisi) bu aşamanın temelini oluşturur (Wheelen & Hunger, 2022, s. 110).
- **Sonuçların Uygulanması ve Değerlendirme:** Geliştirilen stratejilerin hayata geçirilmesinin ardından, performans göstergeleri ile sürekli olarak izleme ve değerlendirme yapılır (Bryson, 2018, s. 95).

2.8.5. Örnek Uygulamalar

2.8.5.1. Teknoloji Şirketi SWOT Analizi Örneği

- **Güçlü Yönler:** Geniş kullanıcı tabanı, yenilikçi AR-GE ekibi, güçlü marka imajı (Kotler & Keller, 2021, s. 191).

- **Zayıf Yönler:** Fazla çeşitlendirilmiş ürün portföyü nedeniyle odak kaybı, yetersiz bölgesel ofis ağı (Hill & Jones, 2021, s. 146).
- **Fırsatlar:** Yapay zekâ ve bulut bilişim alanındaki yeni pazarlar, artan dijitalleşme talebi (Grant, 2021, s. 77).
- **Tehditler:** Yoğun rekabet, veri gizliliği regülasyonlarındaki belirsizlik, küresel ekonomik dalgalanmalar (David, 2019, s. 72).

2.8.5.2 KOBİ (Küçük ve Orta Büyüklükte İşletme) SWOT Analizi

Örneği

- **Güçlü Yönler:** Esnek üretim hattı, yerel pazarda güçlü itibar, hızlı karar alma mekanizması (Bryson, 2018, s. 102).
- **Zayıf Yönler:** Kısıtlı finansman, düşük marka bilinirliği, sınırlı dijital pazarlama bilgisi (Dess et al., 2020, s. 115).
- **Fırsatlar:** Bölgesel kalkınma destekleri, e-ticaretin artan popülaritesi, çevrimiçi platformlarda büyüme imkânı (Kotler & Armstrong, 2020, s. 182).
- **Tehditler:** Büyük ölçekli rakiplerin fiyat rekabeti, ekonomik durgunluk, tedarik zincirindeki küresel aksamalar (Wheelen & Hunger, 2022, s. 127).

Bu tür örnekler, SWOT analizinin çeşitli sektörlerde nasıl esneyebildiğini ve farklı verilere göre nasıl uyarlanabileceğini göstermektedir (Johnson et al., 2020, s. 146; Mucuk, 2019, s. 59).

2.8.6. SWOT Analizinin Avantaj ve Dezavantajları

Swot analizi yönteminin diğer yöntem çeşitlerine göre bünyesinde barındırdığı birtakım avantaj ve dezavantajlar bulunmaktadır. Bunlar iki başlık halinde açıklanmaktadır.

2.8.6.1. Avantajları

- **Basitlik ve Uygulanabilirlik:** SWOT analizi hem akademik hem de pratik düzeyde kolay anlaşılır bir yöntemdir (Porter, 1998, s. 81).
- **Bütüncül Yaklaşım:** İç ve dış çevreyi aynı çerçevede ele alarak kapsamlı bir durum analizi sağlar (Thompson et al., 2021, s. 138).
- **Stratejik Uyum:** Kurumsal hedefler ile çevredeki fırsat ve tehdit unsurlarını örtüştürmeye yardımcı olur (Barney & Hesterly, 2019, s. 28).
- **Kolay Entegrasyon:** PESTEL, Porter'ın Beş Güç Modeli gibi diğer analiz yöntemleriyle birleşik kullanıma elverişlidir (Bryson, 2018, s. 109).

2.8.6.2. Dezavantajları

- **Özellik:** Analiz, katılımcıların algılarına bağlıdır ve bu durum öznel yorumlara yol açabilir (Grant, 2021, s. 82).
- **Derinlemesine İnceleme Eksikliği:** Faktörlerin yüzeysel değerlendirilmesi, strateji geliştirme sürecinde yetersiz kalabilir (David, 2019, s. 80).
- **Önceliklendirme Zorluğu:** Çok sayıda etkenin aynı anda ele alınması, hangi faktörlerin daha kritik olduğunu belirlemede zorluk yaratabilir (Dess et al., 2020, s. 122).
- **Süreklilik İhtiyacı:** Mevcut çevre koşulları hızla değişebilir; bu da analizin sık sık güncellenmesi gerektiğini ortaya koyar (Kotler & Keller, 2021, s. 203).

SWOT analizinden maksimum verim elde edebilmek için, organizasyonların analiz sürecinde titiz veri toplama yöntemleri benimsemesi ve çıktıları düzenli aralıklarla gözden geçirmesi tavsiye edilir (Hill & Jones, 2021, s. 154).

2.9. SWOT Analizinin Geleceği ve Öneriler

Küresel rekabetin yoğunlaşması, teknolojik dönüşümün hız kazanması ve sürdürülebilirlik temelli yaklaşımların öneminin artması, stratejik planlama süreçlerinde yeni ihtiyaçların doğmasına neden olmaktadır (Bryson, 2018, s. 115). Bu kapsamda SWOT analizi, klasik formunu korumakla birlikte, yenilikçi yaklaşımlarla (örneğin SWOT + Balanced Scorecard veya SWOT + OKR) zenginleştirilmektedir (Barney & Clark, 2007, s. 29).

Önümüzdeki yıllarda, kurumsal stratejilerin sadece finansal göstergelerle değil, aynı zamanda çevresel, sosyal ve yönetim (ESG) metrikleriyle de uyumlu olması beklenmektedir (Johnson et al., 2020, s. 160). Bu nedenle, SWOT analizine ek olarak paydaş analizi, sosyal etki analizi gibi ek yöntemlerin de kullanımı artacaktır (Dess et al., 2020, s. 130). Kurumlar, dijital dönüşüm ve veri analitiği konularındaki yetkinliklerini artırarak, veri odaklı bir SWOT çerçevesi geliştirmeye yöneleceklerdir (Kotler & Armstrong, 2020, s. 190).

SWOT analizi, işletmelerin ve projelerin stratejik yönetim sürecinde hem iç hem de dış çevre koşullarını sistematik olarak değerlendirmesine imkân tanıyan temel bir araçtır (Hill & Jones, 2021, s. 159). Kurumlar, güçlü ve zayıf yönlerini tespit ederek, bu yönlerini fırsatlarla buluşturma ve tehditlere karşı koruma stratejileri geliştirme şansı yakalar (David, 2019, s. 91). Böylelikle stratejik planlama, daha gerçekçi ve uygulanabilir bir hale gelir (Wheelen & Hunger, 2022, s. 134).

Elbette SWOT analizi tek başına yeterli değildir. Daha derinlemesine analiz ve stratejik öngörü için PESTEL, Porter'ın Beş Güç Modeli veya kaynak temelli yaklaşımlarla (RBV) birlikte kullanılması önerilir (Barney, 1991, s. 105; Özdemir, 2021, s. 34). Ayrıca, söz konusu analiz çıktılarını periyodik olarak güncellemek, değişen pazar koşulları ve teknolojik yenilikler çerçevesinde verileri yeniden değerlendirmek stratejik yönetim başarısının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir (Bryson, 2018, s. 119).

Bu bağlamda, sürekli iyileştirme ve yenilik kültürünü benimseyen kurumlar, SWOT analizinden elde ettikleri içgörülerini stratejik uyum ilkesi doğrultusunda kullanarak sürdürülebilir bir rekabet avantajı elde edebilirler (Grant, 2021, s. 97).



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR ÜZERİNE SWOT ANALİZİ

Bu bölümde, elektrikli araçların yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle bütünleşik olarak ele alındığında sahip olduğu güçlü yönleri, zayıf yönleri, sektördeki fırsat alanlarını ve karşı karşıya kalınabilecek tehdit unsurlarının ortaya konulması amaçlanmaktadır. Elektrikli araç ekosistemini dört başlık altında inceleyen SWOT analizi, **Güçlü Yönler (Strengths)**, **Zayıf Yönler (Weaknesses)**, **Fırsatlar (Opportunities)** ve **Tehditler (Threats)** olmak üzere dört temel başlıktan oluşmaktadır.

Tablo 2: Swot Analizi Akış Tablosu

GÜÇLÜ YÖNLER	ZAYIF YÖNLER
• Düşük Karbon Salınımı ve Çevre Dostu Özellik ◦ Sera Gazı Emisyonlarında Azalma ◦ Yenilenebilir Enerji Kaynaklarıyla Entegrasyon ◦ Hava Kalitesinin İyileştirilmesi • Yüksek Enerji Verimliliği ◦ Elektrik Motorunun Verimliliği ◦ Regeneratif Fren Sistemi ◦ Enerji Kaynaklarının Daha Etkin Kullanımı • Düşük İşletme ve Bakım Maliyetleri ◦ Az Parçalı Tahrik Sistemi ◦ Elektrğin Göreceli Maliyeti ◦ Kullanıcı Deneyimi ve Servis Kolaylığı • Teknolojik Gelişme ve İnovasyon Potansiyeli ◦ Batarya Teknolojilerindeki İlerleme ◦ Yazılım ve Kontrol Sistemlerinde Gelişme ◦ Sektörler Arası Etkileşim • Enerji Bağımsızlığı ve Jeopolitik Avantaj ◦ Fosil Yakıtlara Bağımlılığın Azalması ◦ Stratejik Ham Madde Kullanımı ◦ V2G (Vehicle-to-Grid) Entegrasyonu	• Yüksek İlk Yatırım Maliyeti ◦ Batarya Maliyetinin Payı ◦ Teşviklerin Sınırlı Olması ◦ Toplam Sahip Olma Maliyeti Farkındalığının Düşük Olması • Sınırlı Şarj Altyapısı ◦ Yaygın İstasyon Eksikliği ◦ Standartlaştırma Sorunları ve Hızlı Şarj İhtiyacı ◦ Şebeke Yük Yönetimi ve Altyapı İyileştirmeleri • Batarya Teknolojisi ile İlgili Sınırlamalar ◦ Enerji Yoğunluğu ve Ağırlık ◦ Ham Madde Tedariği ve Maliyetler ◦ Batarya Ömrü ve Geri Dönüşüm • Uzun Şarj Süreleri ◦ Geleneksel Yakıtı Göre Zamansal Dezavantaj ◦ Ev ve Ofis Şarjının Zaman Maliyeti ◦ Hızlı Şarjın Batarya Ömrüne Etkisi • Toplumsal ve Psikolojik Engel: Menzil Kaygısı (Range Anxiety) ◦ Kullanıcı Alışkanlıkları ◦ Eksik veya Yanlış Bilgilendirme ◦ Güvenilirlik Endişesi
FIRSATLAR	TEHDİTLER

• Hızla Gelişen Teknoloji ve Düşen Batarya Maliyetleri ◦ AR-GE ve İnovasyon Odaklı Büyüme ◦ Daha Uzun Menzilli ve Daha Hızlı Şarj Olan Araçlar ◦ Rekabet Artışıyla Fiyatların Düşmesi • Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu ◦ Güneş ve Rüzgâr Enerjisinin Maliyet Avantajı ◦ Akıllı Şebeke ve V2G (Vehicle-to-Grid) Uygulamaları ◦ Yeşil Dönüşüm Hedefleri ile Uyum • Politik Teşvikler ve Düzenleyici Destek ◦ Vergi İndirimleri ve Hibe Programları ◦ Emisyon Standartlarının Sıkılaşması ◦ Şarj Altyapısı Teşvikleri ve Standartlaştırma • Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine Doğrudan Katkı ◦ Ekonomik Büyüme ve İstihdam ◦ Sağlık ve Sosyal Refah ◦ Şehir Planlaması ve Akıllı Ulaşım Sistemleri • Yeni İş ve Yatırım Fırsatları ◦ Batarya Geri Dönüşüm ve İkinci Ömür Uygulamaları ◦ Şarj Hizmetleri ve Dijital Platformlar ◦ Uluslararası İşbirlikleri ve Ticaret	• Ham Madde Kaynaklı Riskler ve Fiyat Dalgalanmaları ◦ Kritik Minerallerin Jeopolitik Yoğunlaşması ◦ Ham Madde Fiyatlarının Artışı ◦ Tedarik Zinciri Güvencesi • Altyapı Yatırımlarının Yetersizliği ◦ Kamu Kaynaklarının Sınırlılığı ◦ Özel Sektörün İlgisizliği veya Bekle-Gör Tavrı ◦ Coğrafi ve Demografik Engeller • Fosil Yakıt Lobilerinin ve Geleneksel Otomotiv Sektörünün Baskısı ◦ Sektörel Direnç ve Lobicilik ◦ Mevcut Altyapıya Yatırımın Sürmesi ◦ Regülasyon ve Yasa Yapım Süreçlerine Etki • Enerji Üretiminde Fosil Kaynakların Hâlâ Yüksek Payı ◦ Elektrikli Araçların Gerçek Emisyon Avantajı Sorgusu ◦ Karbon Yoğun Enerji Piyasasında Ekonomik Zorluk ◦ Dünya Geneline Farklı Elektrik Üretim Karışımları • Teknolojik Değişimin Belirsizliği ve Pazar Adaptasyonu ◦ Yeni Yakıt Teknolojilerinin Ortaya Çıkması ◦ Tüketici Taleplerindeki Belirsizlik ◦ AR-GE Yatırımlarının Yavaşlaması veya Kayması
---	---

Kaynak: Bu konudaki literatür incelenerek, yazar tarafından derlenmiştir.

3.1. Güçlü Yönler (Strengths)

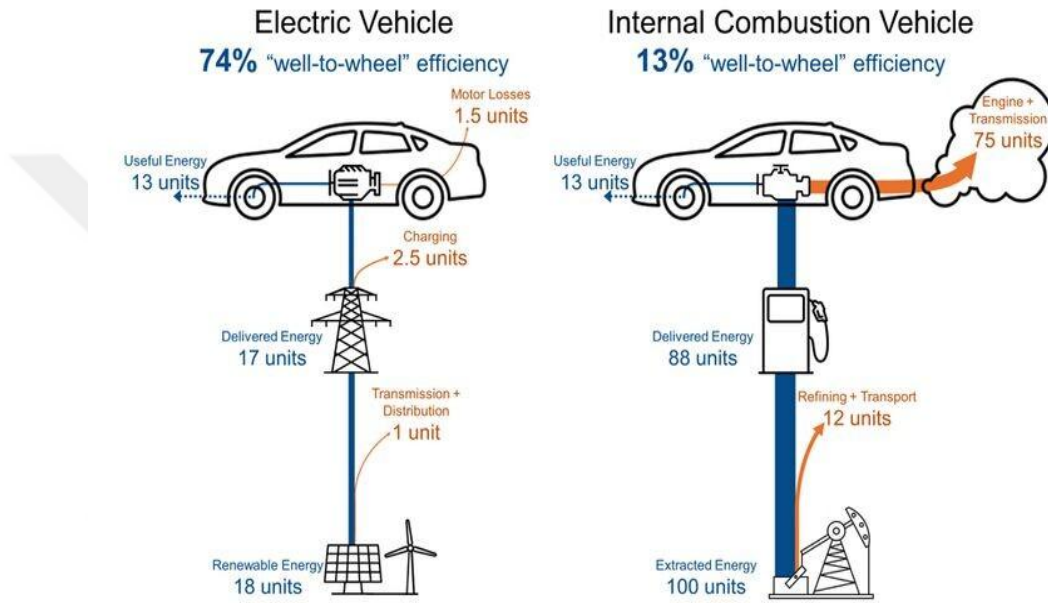
Elektrikli araçlar (EA), yenilenebilir enerji entegrasyonu ve sürdürülebilir kalkınma ekseninde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar, teknolojik, çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutlarıyla çok yönlüdür. Aşağıda, bu güçlü yönler ayrıntılı olarak incelenmektedir.

3.1.1. Düşük Karbon Salınımı ve Çevre Dostu Özellik

Elektrikli araçların içten yanmalı bir motor ünitesine sahip olmamasından dolayı, enerji ihtiyaçlarını bir maddenin yanmasından karşılamamaktadırlar. Bu

sebeple, kullanımları sırasında CO₂ salınımı neredeyse sıfıra yakın olmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2021, s. 22). Özellikle yoğun şehir trafiklerinde içten yanmalı motorlu araçların neden olduğu NO_x, SO_x ve partikül madde (PM) gibi kirlетici emisyonları önemli ölçüde azaltmaktadır (IPCC, 2022, s. 145). Yakıtlı araçların aksine bir egzoz salınımı bulunmaması sebebiyle, kullanılmaları sera gazı emisyonlarında azalmaya yardımcı olmaktadır.

Resim 1: Kuyudan Tekere (well to wheel) Şeması



Kaynak: <https://www.linkedin.com/pulse/electric-vehicle-market-forecast-2024-2030-manideep-patel-m6pgc/>

Resim 1 de elektrikli araçların çıkmasındaki asıl ana akım fikri olan verimlilik konusunun, araçların asıl enerji sağladıkları kaynaklardan itibaren ölçülmesini sağlayan bir hesabın görselleştirilmiş halini görmekteyiz. Bu hesaplama yöntemine “well-to-wheel” yani “kuyudan-tekere” denilmektedir. Elektrikli araçların elektrik enerjisinin üretiminden itibaren aracı hareket ettirmesine kadar geçen sürecin tamamında %74 verimlilik sağlamasına karşılık, yakıtlı araçlarda bu süreç %13 verimlilik ile tamamlanmaktadır. Bunun en önemli sebeplerinden biri yakıtın transferi ve depolanmasında yaşanan kayıplar. Ayrıca, bir diğer sebep olarak içten yanmalı motorlu araçların hareket enerjisine dönüştürme sırasında ısı ve transfer kayıplarıdır. Elektrikli araçlar, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi temiz ve yenilenebilir kaynaklardan

elde edilen elektrik ile şarj edildiklerinde, “kuyudan-tekere” (well-to-wheel) hesaplamalarında dahi karbon ayak izini minimize eder (IEA, 2021, s. 42). Buradaki verimlilik ve düşük maliyetler fosil yakıtlara olan bağımlılığı önemli ölçülerde azaltarak uzun vadede sürdürülebilir enerji sistemlerine ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi hızlandırır (TMMOB, 2024, s. 2-5).

Büyük ve kalabalık şehirlerin günden güne büyüyen problemlerinden birisini de hava kirliliği oluşturmaktadır. Birkaç sebebi olmakla birlikte en önemli olanlardan birisi fosil yakıtların sebep oluğu hava kirliliğidir. Taşıt kaynaklı hava kirliliği, özellikle metropollerde halk sağlığını tehdit eden unsurlardandır. Toplum Elektrikli araçların egzoz emisyonlarının olmaması, şehirlerde hava kalitesini artırarak solunum yolu hastalıklarının önüne geçmeye yardımcı olmaktadır (Sevük, 2021, s. 29). Bu unsurlar, elektrikli araçların sürdürülebilir kalkınma politikaları çerçevesinde benimsenmesinde en önemli motivasyon kaynağıdır. Zira küresel ısınma ve iklim kriziyle mücadelede taşımacılıktan kaynaklanan emisyon payının azaltılması kilit rol oynamaktadır.

3.1.2. Yüksek Enerji Verimliliği

Elektrikli araçların içten yanmalı motorlara göre en büyük avantajlarından biri, motor verimliliğinin çok daha yüksek olmasıdır. İçten yanmalı motorlar, kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürürken yakıtın büyük bir kısmını ısı formunda kaybeder (Durmuş ve Kaymaz, 2020, s. 125). Dolayısıyla benzinli veya dizel bir otomobilde verimlilik genellikle %20-30 aralığında seyreder. Buna karşılık elektrikli motorlarda verimlilik ortalama %85-90 seviyesine ulaşabilir (Menak, Karadağ, Altuğ, Tan, 2021, 236). Bu yüksek verimlilik, elektrik enerjisinin neredeyse tamamına yakınının tekerleklere iletilerek hareket enerjisine dönüştürülmesiyle ilgilidir.

Motor verimliliğinin yüksek olmasının bir diğer kritik sonucu, elektrikli araçların daha düşük enerji tüketimi ve böylece daha düşük işletme maliyetine sahip olmasıdır (Kerem, 2014, s. 6). Yakıt fiyatlarının artışı ve enerji arz güvenliğinin gündemde olduğu bir dönemde, araç kullanıcıları için maliyet avantajı önemli bir tercih sebebi haline gelmektedir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri’nde yapılan bir araştırma, elektrikli araç kullanıcılarının fosil yakıtlı araç kullanıcılarına kıyasla enerji maliyetlerinde ortalama %35 ila %45 arasında tasarruf sağlayabildiğini ortaya koymuştur (United States Department of Energy [DOE], 2020, s. 12). Bunun yanı sıra elektrikli motorlar, hareketli parça sayısının azlığı ve basit mekanik yapıları sayesinde

daha az bakım gerektirir. Bu da araç sahipleri için uzun vadede ciddi bir avantaj anlamına gelmektedir. Parça aşınmasının az olması, sürtünme kayıplarını ve arıza riskini düşürerek araçların ömrünü uzatmaktadır (Gürbüz ve Kulaksız, 2016: 118-120). Dolayısıyla elektrikli araçlar, yalnızca yüksek enerji verimliliğiyle değil, aynı zamanda uzun dönemli kullanım açısından da cazip hale gelmektedir.

Elektrikli araçların öne çıkan bir başka özelliği ise rejeneratif fren sistemidir. Geleneksel araçlarda fren yapıldığında ortaya çıkan kinetik enerjinin önemli bir bölümü ısıya dönüşerek boşa harcanır (Durmuş ve Kaymaz, 2020, s. 126). Oysa elektrikli araçlarda frenleme anında tekerlekler tarafından üretilen enerji, elektrik motoru aracılığıyla yeniden elektrik enerjisine dönüştürülerek bataryaya geri beslenir. Bu sayede aracın toplam enerji verimliliği önemli ölçüde yükselir (Menak, Karadağ, Altuğ, Tan, 2021, s. 239).

Rejeneratif fren sistemleri, özellikle şehir içi trafiğinde sık frenlemelerin yaşandığı koşullarda çok daha etkili olmaktadır. Bazı araştırmalar, rejeneratif frenleme yoluyla araç hareketinde kaybedilen enerjinin %10 ila %30'unun geri kazanılabileceğini öne sürmektedir (Kerem, 2014, s. 4-5). Bu da elektrikli araçların gerçek kullanım koşullarında fosil yakıtlı rakiplerine göre daha düşük enerji sarfiyatı gerçekleştirmesini sağlar. Örneğin, yoğun dur-kalk trafiğe sahip şehirlerde elektrikli araçlar, rejeneratif fren teknolojisini aktif şekilde kullanarak menzillerini artırabilirler (Gürbüz ve Kulaksız, 2016: 119).

Rejeneratif fren sisteminin uzun vadeli etkileri yalnızca enerji kazanımlarıyla sınırlı değildir. Aynı zamanda fren disklerinde ve balatalarda daha az aşınmaya yol açtığı için bakım maliyetlerini de düşürür (DOE, 2020, s. 15). Daha az mekanik yıpranma, kullanım ömrünü uzatarak çevresel atıkların da azalmasına katkıda bulunur. Böylece elektrikli araçlar hem çevresel hem de ekonomik açıdan daha sürdürülebilir bir model sunar.

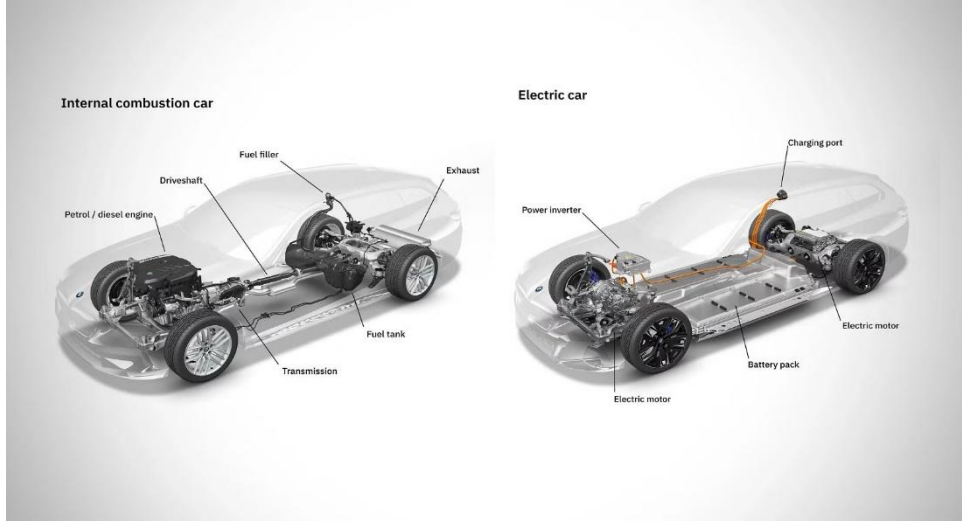
Elektrikli araçlar, enerjiyi fosil yakıtlara göre çok daha etkin kullanabilmeleri sayesinde karbon ayak izini azaltmakta kritik bir rol oynar (IEA, 2021, s. 28). Bu etkin kullanım, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre olabilme potansiyeli sayesinde daha da pekişmektedir. Güneş, rüzgâr veya hidroelektrik gibi temiz enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin araçlara doğrudan aktarılması, fosil yakıt talebini ve yakıt temininden kaynaklanan çevresel etkileri büyük ölçüde ortadan kaldırır (Kuzu vd., 2024: 376).

Ayrıca elektrikli araçlar, akıllı şebeke (smart grid) sistemleriyle bütünleşerek enerji üretim-tüketim dengesine katkı sağlayabilmektedir. Akıllı şebekeler aracılığıyla, şebekede enerji talebinin düşük olduğu saatlerde araçların şarj edilmesi mümkündür (Durmuş ve Kaymaz, 2020, s. 128). Böylece, elektrik altyapısındaki talep dalgalanmaları dengelenirken enerji verimliliği de artış gösterir. Bazı pilot bölgelerde hayata geçirilen V2G (Vehicle-to-Grid) teknolojisi, araçların bataryalarında depolanan enerjiyi şebekeye geri besleyerek enerji yönetimini daha esnek hale getirmektedir (Menak, Karadağ, Altuğ, Tan, 2021, s. 241).

Enerji kaynaklarının etkin kullanımı aynı zamanda ekonomik avantajlar da sunar. Araçların yakıt sarfiyatlarında en fazla payı elinde bulunduran dur-kalk trafiğindeki tüketimdir. Ancak, elektrikli araçlarda içten yanmalı motorların aksine, dur-kalk trafiğinde motor rölanti kayıpları minimum seviyeye inmektedir. Elektrik motoru, araç dururken neredeyse hiç enerji harcamaz (Ustabaş, 2015; 272-274). Ülkeler, elektrikli araçlar sayesinde petrol ithalatına bağımlılıklarını azaltarak enerji güvenliklerini artırabilmektedir (Kerem, 2014, s. 1). Bununla birlikte, yenilenebilir kaynaklara yatırım yaparak uzun vadede daha istikrarlı ve düşük maliyetli enerji tedarik sistemleri oluşturma fırsatı elde ederler (IEA, 2021, s. 30). Bu dönüşüm hem enerji sektörünün hem de otomotiv endüstrisinin yeniden yapılandırılmasını teşvik ederek istihdam yaratıcı bir etki de doğurabilmektedir. Yüksek enerji verimliliği hem ulusal hem de küresel ölçekte enerji kaynaklarının daha etkin kullanımına olanak tanır. Bu sayede, sürdürülebilir enerji politikalarının oluşturulmasında elektrikli araçlar temel aktörlerden biri haline gelmektedir.

3.1.3. Düşük İşletme ve Bakım Maliyetleri

Resim 2: Elektrikli ve İçten Yanmalı Araçların Yürüyen Aksamları



Kaynak: <https://www.drive.com.au/caradvice/electric-cars-vs-petrol-cars-how-do-they-differ/>

Elektrikli araçların tahrik sistemi, içten yanmalı motor teknolojisine kıyasla daha az sayıda hareketli parça içermektedir (Kerem, 2014, s. 5-6). Örneğin, içten yanmalı motorlarda pistonlar, supaplar, krank milleri, eksantrik milleri, enjektörler ve daha pek çok mekanik bileşen bulunurken, elektrikli araçlardaki temel bileşenler motor, inverter ve batarya paketinden oluşmaktadır (Durmuş ve Kaymaz, 2020, s. 132). Bu sadeleştirilmiş yapı, pek çok açıdan avantaj sağlamaktadır.

Yukarıdaki resimde her ne kadar iki aracın aynı miktarda bileşenden oluştuğu gözlemlense de yakıtlı motordaki karmaşık ve bakım maliyeti yüksek yapı elektrik motorunda yerini daha basit ve uzun kilometreler boyunca bakım gerektirmeyen bir yapıya kendini bırakmaktadır. Çoğu elektrikli aracın şaft ve diferansiyel gibi aktarım organlarına sahip olmaması da bakım ve onarım maliyetlerinde çok büyük bir avantaja sahip olduğunu göstermektedir. Diğer yandan, az parçalı tahrik sisteminde sürtünmeye neden olan bileşenlerin sayısı düştüğünden, mekanik aşınma daha azdır. Bu durum, elektrikli araçların bakım gereksinimlerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Özbay vd., 2020: 34-37). Geleneksel motorlarda motor yağı ve filtre değişimi gibi periyodik işlemlerin sık yapılması gerekirken, elektrikli araçlarda bu tür bakım kalemleri neredeyse hiç bulunmamaktadır. Hareketli parça sayısının azlığı genellikle daha düşük ağırlığa da işaret etmektedir. Daha hafif bir araç, daha az enerji tüketerek aynı performansı sağlayabilmektedir (IEA, 2022, s. 14). Böylece menzil kaygısı yaşayan elektrikli araç sürücüleri için daha verimli bir çözüm sunulmuş olmaktadır. Üreticiler için daha az sayıda parça kullanımı, üretim ve montaj süreçlerini kolaylaştırmaktadır. Bu durum, uzun vadede üretim maliyetlerini düşürme potansiyelini barındırmaktadır.

(MEB, 2021, s. 10). Özellikle seri üretimde, bu basitleşme rekabet gücünü artırarak tüketicilere de fiyat avantajı olarak yansıyabilmektedir. Tüm bu etkenler göz önüne alındığında, elektrikli araçların daha az parçalı tahrik sistemleri hem kullanıcılar hem de üreticiler açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Enerji verimliliğinden bakım maliyetlerine, performanstan dayanıklılığa kadar çok yönlü faydalar, bu araçların hızla benimsenmesinde belirleyici rol oynamaktadır (Kerem, 2014, s. 5-7).

Fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar ve çevresel endişeler, küresel ölçekte alternatif enerji kaynaklarına yönelimi artırmaktadır (Durmuş ve Kaymaz, 2020, s. 131). Elektriğin ulaştırma sektöründe bir yakıt olarak kullanımı, içten yanmalı araçların kullandığı benzin ve dizel yakıtlara kıyasla birçok avantaj sunmaktadır. Elektrik motoru, içten yanmalı motorlara kıyasla çok daha az hareketli parçaya sahiptir (Ari, 2020, s. 195). Bu durum, bakım maliyetlerini ve arıza riskini azaltmaktadır. Bakım aralıklarının uzaması, kullanıcılar için zaman ve para tasarrufu anlamına gelmektedir (TÜBİTAK, 2020, s. 60). Bu avantaj, özellikle ticari filolarda (örneğin kargo ve teslimat sektöründe) operasyonel verimliliği artırabilmektedir. Diğer bir yandan, çeşitli ülkelerde yapılan araştırmalar, elektrikli araçların birim mesafe başına tükettiği enerjinin fosil yakıtlı araçlara göre daha ekonomik olduğunu göstermektedir (Özbay vd., 2020: 38-45). Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı'nın (DOE) verilerine göre, elektrikli araçların enerji maliyetleri içten yanmalı araçlara oranla ortalama %35-40 daha düşük seviyede seyretmektedir (DOE, 2021, s. 11). Ayrıca, Petrol ve türevlerinin fiyatları küresel olaylara, arz-talep dengesine ve jeopolitik faktörlere bağlı olarak sıkça değişiklik gösterirken, elektrik fiyatları nispeten daha stabildir (IEA, 2022, s. 16). Bu istikrar, tüketicilerin uzun vadeli maliyet planlamasında belirsizliği azaltmaktadır ve küresel petrol fiyatlarındaki dalgalanmalara kıyasla, elektrik birim fiyatı daha istikrarlı ve uzun vadede öngörülebilir olabilmektedir (IEA, 2021, s. 46). Elektrik, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilir. Dolayısıyla elektrikli araç sahipleri, şebekeden gelen elektriği kullanmanın ötesinde kendi evlerine kurdukları güneş panelleri veya diğer yenilenebilir sistemler aracılığıyla araçlarını şarj edebilmektedirler (MEB, 2021, s. 12). Hatta kullanıcılar geceleri veya düşük tarifeli zaman dilimlerinde şarj edilebilme imkânı ile, işletme maliyetini daha da düşürebilmektedir (Sevük, 2021, s. 31-32). Bu, kullanım maliyetlerini daha da aşağı çekerken karbon ayak izini de önemli ölçüde azaltmaktadır. Elektriğin ucuz ve temiz bir enerji kaynağı olarak ulaşımda kullanılması, sadece bireysel araç sahipleri için

değil, filolar ve toplu taşıma işletmeleri için de ekonomik faydalar sunmaktadır. Örneğin, şehir içi otobüs filolarında elektrikli modellere geçiş yapan birçok belediye, enerji giderlerinde kısa sürede dikkate değer oranlarda tasarruf sağlamıştır (Kerem, 2014, s. 6). Ekonomik açıdan daha avantajlı bir kullanım döngüsü sunması, elektrikli araçların hızla benimsenmesinde etkin bir faktördür. Zira birçok filo yönetimi, ilk yatırım maliyetinden ziyade toplam sahip olma maliyetini (Total Cost of Ownership – TCO) dikkate almaktadır.

Elektrikli araçların bir diğer önemli avantajı, kullanıcı deneyimi ve servis kolaylığı bakımından sunduğu güçlü yönlerdir. Geleneksel araçlara kıyasla farklı bir sürüş ve bakım konseptiyle karşılaşan kullanıcılar, kısa bir uyum süreci sonrasında elektrikli araçların konforunu ve pratikliğini hızla benimsemektedir (Durmuş ve Kaymaz, 2020, s. 134). Elektrikli motorların çalışma prensibi, içten yanmalı motorlardaki patlama ve yanma süreçlerine dayanmadığından, sürüş esnasında motor gürültüsü çok daha düşük seviyededir (Özbay vd., 2020: 42-48). Bu sessizlik, özellikle şehir içi kullanımda hem sürücü hem de çevre açısından konforlu bir deneyim yaratır. Elektrikli motorlar, tam tork değerine anında erişme özelliğine sahiptir. Bu, hızlanmada önemli bir avantaj sağlarken, araç kullanımını daha keyifli hale getirir (Kerem, 2014, s. 1-4). Özellikle dur-kalk trafiğin yoğun olduğu metropollerde, elektrikli araçlar sürücülere seri ve akıcı bir sürüş imkânı tanımaktadır. Elektrikli araçlarda yağ değişimi veya karmaşık motor parçalarının düzenli kontrolü gibi geleneksel araçlarda sıkça yapılan bakımların çoğu gerekmemektedir (MEB, 2021, s. 15). Fren sistemindeki balata ve disk aşınması da rejeneratif frenleme sayesinde azalmaktadır. Bu, kullanıcılar için uzun vadede düşük bakım maliyeti anlamına gelmektedir (DOE, 2021, s. 13). Günümüzde birçok elektrikli araç, sürücülerin cep telefonlarına yükledikleri uygulamalar üzerinden gerçek zamanlı menzil bilgisi, şarj istasyonu konumu, batarya doluluk düzeyi gibi verileri takip edebilmelerine olanak tanımaktadır (IEA, 2022, s. 18). Bu dijital entegrasyon, kullanıcı deneyimini iyileştirdiği gibi enerji tüketiminin de daha verimli yönetilmesini sağlamaktadır. Elektrikli araçların daha sessiz, konforlu ve dijital özelliklerle zenginleştirilmiş kullanıcı deneyimi, geleneksel araçları kullanan pek çok sürücünün elektrikli modellere geçiş yapmasında belirleyici bir etken olmaktadır (Durmuş ve Kaymaz, 2020, s. 129).

3.1.4. Teknolojik Gelişme ve İnovasyon Potansiyeli

Elektrikli araçlar (EA), enerji dönüşümü ve sürdürülebilirlik kavramlarının yükselen bir trend haline geldiği günümüzde, içten yanmalı motorlu araçlara (IYMA) göre birçok teknik ve çevresel avantaj sunmaktadır (Kerem, 2014, s. 7-11; Güner, 2020, s. 12). Bu avantajlar arasında, batarya teknolojilerindeki hızlı ilerleme, yazılım ve kontrol sistemlerinde yaşanan yenilikler ve farklı sektörleri ortak bir paydada buluşturarak etkileşimi hızlandırma potansiyeli dikkat çekicidir (Gürbüz ve Kulaksız, 2016: 119). Elektrikli araçların yenilikçi karakteri, endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm çağında sadece otomotiv sektörüne değil; enerji, bilişim, lojistik gibi pek çok alana da öncülük etmekte ve bu alanlarda büyük değişimleri tetiklemektedir (IEA, 2022, s. 12). Son yıllarda, araç pazarında elektrikli otomobillerin payının hızla yükselişi tesadüfi değildir. Enerji yoğunluğu artan bataryalar, kısalan şarj süreleri, gelişen yazılım ve kontrol teknolojileri sayesinde uzayan menzil ve kolaylaşan operasyonel işlemler, elektrikli araçları giderek daha cazip hâle getirmektedir (Köksal, vd., 2024, s. 84). Ayrıca, EA'ların farklı sektörlerle kurduğu etkileşim, yeni yatırım fırsatlarının ve teknolojik iş birliklerinin önünü açarak küresel çapta bir dönüşüme katkı yapmaktadır (Menak, Karadağ, Altuğ, Tan, 2021, s. 245).

Batarya teknolojilerindeki ilerlemeler, elektrikli araçların menzil, performans ve maliyet açısından rekabet gücünü belirleyen en kritik unsurların başında gelmektedir. Geçmişte, elektrikli araçlar daha çok kısa menzil ve yüksek maliyet nedeniyle sınırlı bir kullanım alanı bulurken, lityum-iyon bataryalardaki gelişmeler bu sınırlılıkları büyük ölçüde hafifletmiştir (Kerem, 2014, s. 2-3). Özellikle lityum-iyon pillerin enerji yoğunluğunun her yıl belirgin ölçüde artması, tek bir şarjla 400-500 km veya daha fazla mesafe kat edebilen modellerin yaygınlaşmasını mümkün kılmıştır (Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 119; IEA, 2021, s. 22). Bununla birlikte, batarya üretim maliyetlerinin 2010'dan bu yana yaklaşık %80 oranında düşmesi, elektrikli araç fiyatlarını daha erişilebilir kılmış ve fosil yakıtlı araçlarla fiyat rekabetine imkân tanımıştır (Roskill, 2020, s. 41). Günümüzde, katı hâl (solid-state), lityum-kükürt ve lityum-hava gibi yeni nesil batarya teknolojilerine yönelik AR-GE faaliyetleri devam etmekte, bu çalışmalar daha hızlı şarj, daha yüksek güvenlik ve daha iyi enerji yoğunluğu gibi ilerlemeler vaat etmektedir (Menak, Karadağ, Altuğ, Tan, 2021, s. 244). İçten yanmalı motorlarda benzer düzeyde bir sıçrama sınırlı kaldığından, elektrikli araçların gelecek yıllarda batarya teknolojilerindeki kazanımlarla birlikte

daha yüksek inovasyon potansiyeline sahip olacağı öngörülmektedir (Köksal, vd., 2024, s.111).

Yazılım ve kontrol sistemlerindeki gelişmeler, elektrikli araçların sadece güç aktarma organlarına değil, aynı zamanda araç içi deneyim ve güvenlik standartlarına da büyük katkı sağlamaktadır. Elektrik motoru, inverter, batarya yönetim sistemi gibi bileşenlerin daha fazla elektronik tabanlı olması, araç üzerindeki yazılımın da kritik bir rol üstlenmesine yol açmıştır (Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 122; Kim & Seo, 2020, s. 63). Gelişmiş enerji yönetimi algoritmaları, sürüş koşullarına göre optimum güç dağıtımı yaparak menzili artırırken, bataryanın da ömrünü korumaktadır (Menak, Karadağ, Altuğ, Tan, 2021, s. 246). Sensörler aracılığıyla anlık veriler toplanarak sistemin kendini sürekli güncelleyebilmesi, elektrikli araçları daha güvenli ve daha verimli kılmaktadır (Kerem, 2014, s. 5-7; DOE, 2020, s. 11). Diğer yandan, uzak yazılım güncellemeleri (OTA) sayesinde sürücüler, servise gitmeksizin yeni sürüş modları, şarj optimizasyonu ve güvenlik yamaları gibi iyileştirmelere erişebilmektedir (IEA, 2022, s. 20). Otonom sürüş yeteneklerinin elektrikli araçlarda daha kolay entegre edilebilir olması da dikkate değerdir. İçten yanmalı araçlara göre daha az mekanik bileşenin bulunduğu bu platformlar, yapay zekâ tabanlı sensör ve kamera sistemleriyle bütünlük çalışabilme konusunda büyük bir avantaj sağlamaktadır (Kim & Seo, 2020, s. 66). Böylece otonom sürüş, araç paylaşım uygulamaları, akıllı trafik yönetimi gibi yeni nesil mobilite çözümleri hızla gelişirken, şehir planlaması ve lojistik gibi alanlarda da yenilikçi uygulamalar yaygınlaşmaktadır (Jia & Wang, 2020, s. 98).

Elektrikli araçlar, sadece otomotiv sektörünün değil birçok farklı sektörün de dönüşümünü tetikleyen bir ekosistem yaratmaktadır. Enerji sektöründe yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektriğin artan talebi, güneş ve rüzgâr enerjisi yatırımlarını teşvik ederken akıllı şebeke (smart grid) projelerinin önünü açmıştır (IEA, 2021, s. 24; MEB, 2021, s. 33). Şarj istasyonu ağlarının yaygınlaşması, enerji depolama sistemleri ve dağıtık üretim konseptini hızlandırarak, enerji altyapısının çok paydaşlı bir yapıya dönüşmesine olanak tanımaktadır (Roskill, 2020, s. 44; Xu et al., 2022, s. 110). Dijital platformlar ve mobil uygulamalar aracılığıyla sürücüler; şarj istasyonlarının konumu, doluluk durumu, enerji fiyatları gibi bilgilere gerçek zamanlı olarak erişebildikleri için hizmet sektörü de veri analitiği ve bulut bilişim çözümleri geliştirmede büyük fırsatlar yakalamıştır (Kim & Seo, 2020, s. 68; DOE, 2020, s. 14). Ayrıca, otonom araç teknolojileri, robotik lojistik çözümleri ve akıllı şehir planlamasında kullanılan altyapı çalışmaları hep birlikte değerlendirildiğinde, elektrikli araçların farklı sektörlerin AR-

GE yatırımlarını hızlandırdığı gözlenmektedir (Köksal, vd., 2024, s. 89). Bu durum, içten yanmalı motorlu araçlara göre daha geniş bir inovasyon ekosistemi yaratarak teknolojik gelişme potansiyelini süratle yükseltmektedir (Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 122). Teknoloji ve inovasyon boyutunda, elektrikli araçlar yalnızca bir ulaşım aracı değil; aynı zamanda geleceğin akıllı şehirleri ve dijital ekonomisi için temel bir “platform” olarak görülmektedir. Bu platform yaklaşımı, güçlü bir inovasyon ekosisteminin oluşmasına zemin hazırlamaktadır.

Sonuç olarak, batarya teknolojilerindeki ilerlemeler, yazılım ve kontrol sistemlerindeki atılımlar ve sektörler arası etkileşimi hızlandırma kabiliyeti, elektrikli araçların geleceğin ulaşım ekosisteminde baskın bir rol oynamasına zemin hazırlamaktadır (Kerem, 2014, s. 10; IEA, 2022, s. 27). Batarya maliyetlerinin düşmesiyle birlikte menzil ve performans konusundaki çekinceler giderek azalırken, esnek ve güncellenebilir yazılım yapısı sayesinde elektrikli araçlar daha güvenli ve kullanıcı dostu bir sürüş deneyimi sunmaktadır (Menak, Karadağ, Altuğ, Tan, 2021, s. 236; Jia & Wang, 2020, s. 99). Üstelik otomotiv sektörünün ötesinde enerji, bilişim, lojistik gibi alanlarda da değer yaratan ve iş birliğini güçlendiren bu teknolojik ekosistem, içten yanmalı araçların uzun süredir yakalayamadığı oranda hızlı bir sıçrama potansiyeline sahiptir (Köksal, vd., 2024, s. 85). Dolayısıyla, elektrikli araçlar sadece bugünün sürdürülebilirlik hedeflerini karşılamakla kalmamakta, aynı zamanda geleceğin akıllı ulaşım çözümlerini şekillendiren bir teknoloji platformu olarak da öne çıkmaktadır (Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 119; Xu et al., 2022, s. 112).

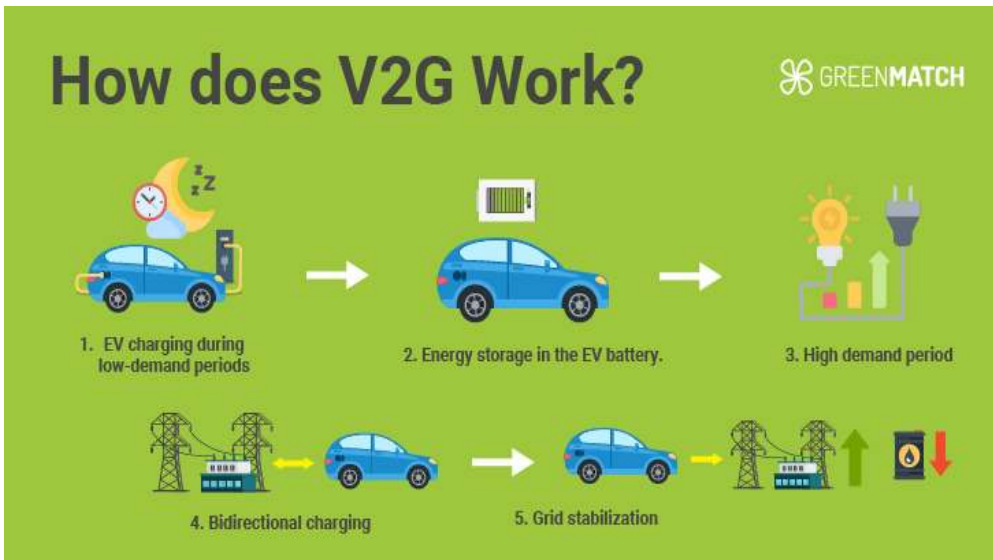
3.1.5. Enerji Bağımsızlığı ve Jeopolitik Avantaj

Elektrikli araçların (EA) enerji bağımsızlığı ve jeopolitik açıdan sunduğu avantajlar, günümüz küresel koşullarında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Zira fosil yakıtların üretimi, fiyatlandırılması ve sevkiyatındaki dalgalanmalar, birçok ülkenin ekonomisini ve dış politikasını doğrudan etkilemektedir (Rezvani, vd., 2018, s. 1272). Elektrikli araçlar, petrol ve doğalgaz gibi ithal kaynaklara olan bağımlılığı azaltarak hem uzun vadeli enerji güvenliği sağlamakta hem de dış şoklara karşı ulusal ekonomiyi dayanıklı kılmaktadır (Zhao vd., 2019, s. 20). Bu sayede, jeopolitik gerilimlerin ve arz kesintilerinin yol açabileceği olumsuz senaryolar daha yönetilebilir hale gelmektedir. Ayrıca, EA’ların güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve nükleer gibi farklı enerji kaynaklarıyla entegre edilebilme özelliği, ülkelerin yatırım portföylerini çeşitlendirmelerine olanak tanımakta ve toplam enerji arzını çok daha istikrarlı bir

çerçeveye oturtmaktadır (Zhou ve Li, 2018, s. 425). Böylelikle fosil yakıtlarla çalışan araçların tekil bağımlılığından çıkılarak yerli ve yenilenebilir kaynaklar üzerinden sürdürülebilir bir ulaştırma ve enerji modeli inşa edilebilmektedir (Tsiropoulos vd., 2018).

Bu dönüşümün en dikkat çekici boyutlarından biri, lityum, kobalt ve nikel gibi stratejik hammaddelerin giderek daha önemli hale gelmesidir. Geleneksel petrol eksenindeki jeostratejik rekabet, elektrikli araçların yükselişiyle birlikte bu defa kritik maden rezervleri üzerinde yoğunlaşmaktadır (Li, 2020, s. 203). Bu metal ve mineraller, bataryaların enerji yoğunluğunu ve dayanıklılığını artırırken aynı zamanda bir dizi tedarik zinciri endişesini de beraberinde getirmektedir (Abdülvahitoğlu, Abdülvahitoğlu, 2023, s. 227-228). Dolayısıyla ülkeler, maden politikalarını yeniden düzenleyerek hem yerli kaynakların kullanımını teşvik etmekte hem de geri dönüşüm teknolojilerine yatırım yaparak yurt dışı kaynaklara bağımlılığı azaltmaya çalışmaktadır (Ustabaş, 2015; 269). Bu stratejik hammadde meselesi, yenilikçi batarya üretimi ve gelişmiş geri kazanım yöntemleri sayesinde ekonomik fırsatlar yaratarak elektrikli araç ekosistemini desteklemekte, böylelikle enerji bağımsızlığı hedefi teknolojik AR-GE projeleriyle doğrudan bağlantı kurarak daha kapsayıcı bir hale gelmektedir (Rezvani, vd., 2018, s. 1275).

Resim 3: Vehicle to Grid (V2G) Şeması



Kaynak: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/vehicle-to-grid>

Elektrikli araçların sunduğu bir diğer kritik fırsat ise “vehicle to grid” (V2G) adı verilen teknolojiyle doğrudan ilgilidir. V2G, araçların yalnızca tüketici rolünde

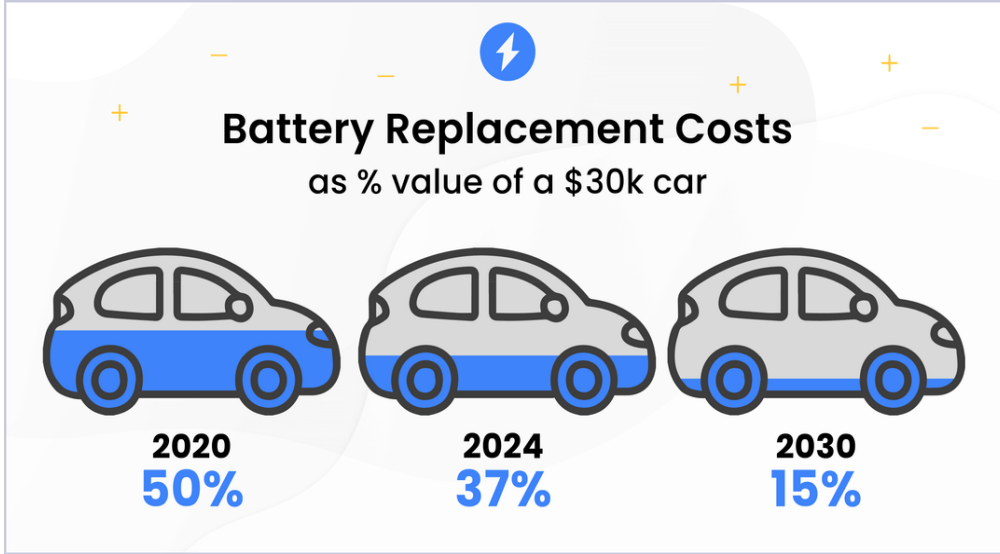
kalmayıp şebekeye ihtiyaç halinde enerji sunabilmeleri anlamına gelir (*Lavieri & Olivera, 2021, s. 10-12*). Resim 3 de bu sistemi açıklamak için bir şema verilmiştir. Bu sistem sayesinde, yoğun talep dönemlerinde elektrikli araçlar şebekeyi destekleyerek kesintilerin önüne geçebilir veya talebin düşük olduğu saatlerde bataryalarına depoladıkları enerjiyi tekrar şebekeye aktararak üretim-tüketim dengesini iyileştirir (*Kawalski ve Depta, 2019, s. 70; Nguyen ve Park, 2021, s. 363*). Böyle bir etkileşim modeli, yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğin daha verimli kullanılmasını sağlarken şebekenin esnekliğini artırmakta ve ülkelerin enerji portföyünü dışa bağımlılıktan uzaklaştırmaktadır (*Yu, vd., 2022*). Dahası, V2G entegrasyonu sayesinde yerli sanayi de önemli bir atılım yaparak hem yazılım hem donanım alanlarında yeni teknolojiler geliştirmekte ve akıllı şehir projelerine öncülük etmektedir (*Polat, 2020, s. 110*). Bu bağlamda, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azalması, stratejik hammaddelerin verimli biçimde yönetilmesi ve elektrikli araçların şebekeyle çift yönlü bütünleşmesi, enerji bağımsızlığı ve jeopolitik avantajlar açısından EA'ları geleceğin ulaşım ve enerji altyapısının merkezine yerleştirmektedir (*Rong, vd., 2017, s.234*).

3.2. Zayıf Yönler (Weaknesses)

Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlarla kıyaslandığında birtakım zayıf yönlere de sahiptir. Bu hususlar, teknolojik ve ekonomik kısıtlar, altyapı eksiklikleri, toplumsal algı ve politik belirsizlikler şeklinde özetlenebilir. Aşağıda bu zayıf yönler ayrıntılı şekilde açıklanmaktadır.

3.2.1. Yüksek İlk Yatırım Maliyeti

Resim 4: Elektrikli Araçların Batarya Maliyetlerinin Toplam Maliyetlerine Oranı



Kaynak: <https://www.recurrentauto.com/research/costs-ev-battery-replacement>

Elektrikli araçların (EA) zayıf yönlerinden biri olan yüksek ilk yatırım maliyeti, büyük ölçüde batarya teknolojisinin gelişim süreci ve bu teknolojinin henüz ölçek ekonomilerini tam olarak yakalayamamasıyla açıklanabilmektedir (Kuzu, vd., 2024; 375-377). Elektrikli araçların toplam üretim maliyetinin önemli bir kısmını batarya oluşturmaktadır. Resim 4'te gördüğümüz üzere, lityum-iyon bataryaların maliyeti son yıllarda düşse de hâlâ içten yanmalı araçlarla fiyat eşitliğine tam anlamıyla ulaşılmış değildir (TÜBİTAK, 2020, s. 63). Bu sebeptendir ki, bataryalar elektrikli araçların üretimindeki en pahalı bileşenlerden biri olup toplam araç maliyetinin yaklaşık %30 ila %40'ını oluşturacak kadar önemli bir paya sahiptir (Zhao vd., 2019, s. 22). Bu durum, tüketicilerde “ilk satın alma maliyeti” açısından çekinceler doğurabilmektedir (Sevük, 2021, s. 29-31). Lityum-iyon batarya teknolojilerinde yaşanan ilerlemeler ve AR-GE projeleri sayesinde son on yılda kayda değer bir maliyet düşüşü görülmüş olsa da bu gerileme içten yanmalı motorlu araçların (IYMA) ölçek ekonomileriyle kıyaslandığında hâlâ yetersiz kalabilmektedir (Zhang, vd., 2018, 500). Özellikle lityum, kobalt ve nikel gibi stratejik minerallerin arz zincirindeki jeopolitik riskler, ham madde fiyatlarını dalgalanmalara açık hale getirerek batarya maliyetlerini istikrarsızlaştırabilmektedir (Lavieri ve Olivera, 2021, s. 25). Bununla birlikte, üretim sürecinde yüksek teknolojiye dayanan komponentlerin varlığı, uzmanlaşmış iş gücü ihtiyacını da artırarak operasyon maliyetlerini yükseltebilmektedir (Köksal, vd., 2024, s. 109). Bu tablo, batarya maliyetinin toplam araç fiyatına etkisini daha belirgin kılmakta ve tüketiciler açısından elektrikli araçların ilk satın alma aşamasında caydırıcı

bir faktör oluşturmaktadır (Tören ve Mollahasanoğlu, 2022, s. 1089). Yine de son yıllarda Tesla, BYD, LG Energy Solution ve benzeri şirketlerin seri üretim hamleleriyle batarya maliyetlerinde kademeli bir düşüş eğilimi gözlemlenmekte; eğer bu trend hız kazanırsa elektrikli araçların ilk yatırım maliyeti IYMA'larla daha rekabetçi bir düzeye gelebilecektir (Batmaz, 2023, s. 25-27).

Yüksek ilk yatırım maliyetini tetikleyen bir diğer unsur ise devlet teşviklerinin henüz yeterince kapsamlı olmamasıdır (Göksu, 2020, s. 45). Birçok ülke, elektrikli araçlara yönelik vergi indirimleri, satın alım desteği, ÖTV muafiyeti veya düşük faizli kredi gibi çeşitli teşvik politikaları uygulasa da bu politikaların kapsamı genellikle sınırlı kalmaktadır (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 225). Devlet desteği olmaksızın, elektrikli araçların fiyat rekabetine girmesi daha zor olmaktadır. Bazı ülkelerde sunulan vergi indirimleri, teşvikler ve ÖTV avantajları sona erdiğinde satışlarda azalmalar görülebilir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2021, s. 17). Örneğin, bazı bölgelerde tüketiciler yalnızca belli bir gelir düzeyine sahip olduklarında ya da araç fiyatının belli bir üst sınırın altında olması hâlinde devletten teşvik alabilirler (IEA, 2022, p. 27; Abdülvahitoğlu, Abdülvahitoğlu, 2023, s. 229). Ayrıca altyapı desteği, yani hızlı şarj istasyonlarının kurulumu ve bakımının sübvansiyonu da yeterince yaygın olmadığı için potansiyel EA kullanıcıları, şarj olanaklarının kısıtlı kalmasından dolayı bu araçlara yatırım yapmaktan çekinebilmektedir (Kaya, 2020, s. 62; Li, 2020, p. 212). Bu çekince, ölçek ekonomilerini geciktirerek üretim hacmini sınırlayabilmekte ve bir kısır döngü yaratarak yüksek maliyetlerin düşüş hızını yavaşlatmaktadır (Çelik, 2021, s. 44). Teşviklerin sınırlı olması aynı zamanda yerli ve yabancı yatırımcıların elektrikli araç üretiminde sağlanacak avantajlara yönelik beklentilerini de düşürmekte ve batarya üretimi, AR-GE çalışmaları veya yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi alanlarda beklenen atılımların gerisinde kalınmasına neden olabilmektedir (Kılıç, 2020, s. 58; Qiu & Zhu, 2021, p. 174).

Tüm bunların yanı sıra, yüksek ilk yatırım maliyeti konusunun merkezinde yer alan bir başka zorluk da toplam sahip olma maliyeti (total cost of ownership – TCO) konusundaki farkındalığın düşük olmasıdır (Tören ve Mollahasanoğlu, 2022, s. 1090). Birçok tüketici, araç satın alırken yalnızca başlangıç fiyatını değerlendirdiğinden, elektrikli araçların uzun vadede sağlayacağı enerji, bakım ve vergi avantajlarından haberdar olmayabilmektedir (Öner, 2022, s. 46; *Lavieri & Olivera, 2021, s. 32*). Bu konudaki bilgi eksikliği, yüksek ilk yatırım maliyetinin bir engel olarak algılanmasına sebep olmaktadır (Ustabaş, 2015; 273). Özellikle batarya ömrünün garanti kapsamı ve

ilerleyen yıllardaki yenileme maliyeti, EA'lara yönelik ön yargıları körüklemekte, oysa güncel araştırmalar, düzenli bakım ve uygun şarj rutinleriyle bataryaların beklenenden daha uzun bir kullanım ömrü sunabildiğini ortaya koymaktadır (Kuzu, vd., 2024; 383). Ayrıca elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlarda sık gerçekleşen yağ ve filtre değişimi gibi bakım kalemlerine ihtiyaç duymadığından, operasyonel giderlerin düşük olması sayesinde toplam sahip olma maliyetini düşürmektedir (Tekin, 2021, s. 17). Yine de bu avantajların tüketicilerde yeterince bilinç oluşturmaması, ilk yatırım maliyeti dezavantajını telafi edecek uzun vadeli kazançların göz ardı edilmesine yol açmaktadır (Tsiropoulos vd., 2018). Toplumsal farkındalık çalışmaları, üreticilerin pazarlama stratejileri ve hükümetlerin bilgilendirme kampanyaları sayesinde kullanıcıların EA'ların gerçek maliyet analizini daha iyi yapmaları sağlandığında, yüksek ilk yatırım maliyetinin yarattığı olumsuz algı belirgin ölçüde azalabilir (Batmaz, 2023, s. 29). Yüksek ilk yatırım maliyeti, özellikle gelişmekte olan ülkelerde pazara giriş bariyeri oluşturabilmektedir. Ancak zamanla ölçek ekonomisi, teknoloji ilerlemesi ve devlet destekli teşvik paketleriyle bu zayıf yönün görece etkisinin azalması beklenmektedir (Ari, 2020, s. 194).

3.2.2. Sınırlı Şarj Altyapısı

Elektrikli araçların (EA) yaygınlaşmasının önündeki en belirgin zorluklardan biri, yeterli kapsama sahip şarj istasyonlarının olmamasıdır. Fosil yakıt istasyonlarının erişilebilirliğine kıyasla elektrikli şarj istasyonları henüz yeterince yaygınlaşmış değildir (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2020, s. 12). Bu durum, özellikle şehir dışı seyahatlerde ve kırsal bölgelerde ciddi bir handikap olarak öne çıkmakta ve sürücülerin “menzil kaygısı” yaşamasına sebep olabilmektedir (Yılmaz, vd., 2024, 7-22; *Lavieri & Olivera, 2021, s. 12-20*). Mevcut istasyonların coğrafi dağılımı büyük kentlerin merkezleriyle sınırlı kalmakta ve kırsal kesimlerde veya şehirlerarası ana arterlerden uzak bölgelerde elektrikli araç sürücüleri sıklıkla şarj imkânına erişmekte zorlanmaktadır (Batmaz, 2023, s. 25-26). Ayrıca, fosil yakıt istasyonlarının uzun yıllar boyunca oluşturduğu yaygın altyapının aksine, elektrikli araçlar için henüz böylesine kapsamlı bir şebeke ağı oluşmamıştır (Güner, 2020, s. 55). Bu eksiklik, tüketicilerin “menzil kaygısını” artırmakta ve EA satın alma kararlarını ertelemelerine yol açmaktadır (Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 119; Carter, 2020, p. 76). Öte yandan, bazı bölgelerde yerel yönetimlerin veya özel sektörün girişimiyle kurulan pilot istasyonlar bulunsa da bu projelerin sürdürülebilirliği çoğu zaman maliyet, izin süreçleri, arazi

temini gibi engeller nedeniyle sekteye uğramaktadır (Rong, vd., 2017, s.237). Bunun yanı sıra, hızlı şarj istasyonlarının kurulumu için daha yüksek güç altyapısına ihtiyaç duyulması, elektrik şebekesinin yeterliliğiyle doğrudan ilişkili olduğu için yatırımcılar açısından ekstra bir risk unsuru oluşturmaktadır (Abdülvahitoğlu, Abdülvahitoğlu, 2023, s. 242). Sonuç olarak, yeterince yaygın istasyon ağına sahip olunmaması, elektrikli araçların pratik kullanımını kısıtlamakta ve geleneksel içten yanmalı motorlu araçlarla kıyaslandığında EA'ların halen bir "niş" pazar konumunda kalmasına neden olmaktadır (Bektaş, 2021, s. 30; Gupta, 2019, p. 59).

Sınırlı şarj altyapısının bir başka önemli boyutu ise standartlaştırma sorunları ve hızlı şarj ihtiyacının farklı şarj protokolleri etrafında şekillenmesidir. Bugün küresel ölçekte CHAdeMO, CCS (Combined Charging System), Tesla Supercharger ve GB/T gibi farklı hızlı şarj standartları mevcuttur (Zhang, vd., 2018, 505). Bu şekilde çeşitli şarj standartları ve soket tasarımları, kullanıcı deneyimini zorlaştırabilir (Nasrallah, vd., 2015). Bu çeşitlilik, ülkeler ve üreticiler arasında ortak bir protokolün henüz tam anlamıyla benimsenmemesine yol açarak kullanıcıların kafalarını karıştırmaktadır (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 223-224). Bir elektrikli araç kullanıcısının farklı şarj istasyonlarına erişmesi, çoğu zaman uygun fiş/konnektör veya şarj protokolüne sahip olup olmadığına bağlı olduğu için sürücüler uzun yolculuklarını planlarken ekstra endişe yaşayabilmektedir (Tury, 2019, s. 113). Buna ek olarak, hızlı şarj sistemleri her ne kadar menzil kaygısını gidermek adına kritik olsa da çok yüksek güç gereksinimi ve altyapı maliyeti nedeniyle henüz her bölgede ekonomik bir seçenek hâline gelmemiştir (Sezer, 2021, s. 50; Lavieri ve Olivera, 2021, s. 5-20). Hızlı şarj noktalarının kurulumu esnasında şebeke bağlantısı, güç talebinin yoğun olduğu saatlerde ek yük getirebilir ve bu da enerji şirketleri ile istasyon yatırımcıları arasında koordinasyon sorunlarına neden olabilmektedir (Orta, 2022, s. 33; Sun, 2021, p. 201). Dolayısıyla hem global hem yerel düzeyde şarj protokollerini standardize etme yönündeki çabalar, elektrikli araç pazarının gelişimi ve kullanıcı memnuniyetinin yükselmesi için kritik bir role sahiptir (Güngör, 2020, s. 73; Patel, 2020, p. 145).

Yetersiz şarj altyapısı konusunun üçüncü ve belki de en teknik yönü, şebeke yük yönetimi ve altyapı iyileştirmesine duyulan ihtiyacı kapsamaktadır. Elektrikli araçların sayısının artması, özellikle hızlı şarj istasyonlarının yoğun talep gördüğü bölgelerde, elektrik şebekesine ek yük bindirerek enerji arz-talep dengesinde ciddi dalgalanmalara yol açabilmektedir (Köksal, vd., 2024, s. 92). Elektrikli araç sayısı arttıkça, özellikle pik saatlerde şebekenin ek yükü kaldırabilmesi için dağıtım

altyapısının güçlendirilmesi gerekmektedir (TMMOB, 2024, s. 4). Bazı araştırmalar, akıllı şebeke (smart grid) teknolojileri sayesinde yük dengelemesi ve talep yönetimi sistemlerinin kullanımının, elektrikli araçların şarj profiline dair öngörülebilirliği artırabileceğini savunmaktadır (Kawalski ve Depta, 2019, 71). Örneğin, “vehicle-to-grid” (V2G) uyumlu altyapı uygulamaları sayesinde elektrikli araçlar, enerji tüketicisi olmaktan öte, belirli koşullarda şebekeye enerji sağlayabilen birer mikro depolama ünitesine dönüşebilmektedir (Kuzu vd., 2024, s. 376). Ancak böylesine gelişmiş bir sistemin tam anlamıyla çalışabilmesi için dağıtım şebekelerinde ek yatırımlar, yüksek kapasiteye sahip transformatörler, güç elektronik elemanlar ve iki yönlü iletişim protokolleri gerekmektedir (Köksal, vd., 2024, s. 119). Ayrıca kırsal bölgelere doğru yayılan hızlı şarj istasyonları için uzun mesafeli elektrik iletim hatlarının güçlendirilmesi veya ek trafo merkezlerinin inşa edilmesi de bir zorunluluk haline gelebilir (Rong, vd., 2017, s.238). Bütün bu önlemlerin finansmanını ve organizasyonunu devlet kuruluşları, özel sektör ve yerel yönetimler arasında koordineli bir iş birliği çerçevesinde düzenlemek, altyapı eksikliğini gidermenin en etkin yolu olarak öne çıkmaktadır (Tören ve Mollahasanoğlu, 2022, s. 1092). Sonuç olarak, sınırlı şarj altyapısı; yaygın istasyon eksikliği, standartlaştırma zorlukları ve hızlı şarj protokollerinin oluşturduğu karmaşa ile şebeke kapasitesinin geliştirilmesi ihtiyacı gibi konuların bileşimi olarak görülmekte ve elektrikli araçların daha geniş kitlelere ulaşmasının önündeki önemli engellerden biri olmaya devam etmektedir (Öner, 2021, s. 78; Patel, 2020, p. 147). Altyapı yetersizliği, elektrikli araçların yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biridir. Bu konuda kamu-özel sektör iş birliği, hızlı ve entegre çözümler sunarak zayıf yönleri giderme potansiyeline sahiptir (Ari, 2020, s. 197).

3.2.3. Batarya Teknolojisi ile İlgili Sınırlamalar

Elektrikli araçların (EA) günümüz ulaşım ekosistemindeki payı hızla artarken, bu araçların en kritik bileşeni olan bataryalar, farklı avantajlarının yanı sıra bazı teknik sınırlamaları da beraberinde getirmektedir (Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 122; Li, 2020, p. 102). Bu sınırlamaların başında gelen enerji yoğunluğu ve ağırlık ilişkisi, bir aracın menzilini ve performansını doğrudan etkilediği gibi maliyet ve tasarım açısından da belirleyici bir rol oynamaktadır. Mevcut lityum-iyon bataryalar, içten yanmalı motorlu araçların yakıt depolarına kıyasla daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu durum, menzil kısıtlamalarını beraberinde getirebilir (TÜBİTAK, 2020, s.

65). Mevcut lityum-iyon batarya teknolojisi, geleneksel içten yanmalı motorların (IYMA) yakıt depolarına kıyasla birim hacimde daha az enerji yoğunluğuna sahiptir (Karaca, 2021, s. 44; Patel, 2019, p. 67). Örneğin, bir litre benzinin sağladığı enerji ile aynı miktarda elektrik enerjisi, mevcut batarya teknolojileriyle kıyaslandığında çok daha büyük bir kütle ve hacim gerektirebilmektedir. Bu da elektrikli araçların toplam ağırlığını önemli ölçüde yükselterek hem sürüş dinamikleri hem de menzil üzerinde doğrudan olumsuz etkiler yaratmaktadır (Tsiropoulos vd., 2018). Ağır batarya paketlerinin kullanıldığı araçlarda daha büyük ve güçlü şasi tasarımlarına ihtiyaç duyulması, üretim maliyetlerini ve enerji tüketimini arttırırken, özellikle performans odaklı otomobillerde hızlanma ve yüksek hız kabiliyetlerini sınırlayabilmektedir (Mozafar, vd., 2018, s. 168). Bu noktada, lityum-iyon bataryaların enerji yoğunluğu konusundaki ilerlemeler oldukça kayda değerdir. Zira son on yılda bir kWh'lik depolama kapasitesini sağlayan batarya paketlerinin kütlelerinde ve hacminde düşüş kaydedilmiş, böylece örneğin 2010'lu yıllarda 200-250 Wh/kg seviyesinde olan enerji yoğunluğu, 2020'lerde 250-300 Wh/kg seviyelerine ulaşmıştır (Zhao vd., 2019, s. 19). Ancak bu artışa rağmen, IYMA'ların sunduğu enerjinin yüksek yoğunluğu ile karşılaştırıldığında elektrikli araçların halen bir dezavantajı olduğu açıktır (Güner, 2021, s. 12). Mevcut teknolojik gelişmeler, yüksek nikel veya katı-hâl (solid-state) bataryalar gibi yeni nesil yaklaşımların enerji yoğunluğunu daha da artırabileceğine işaret etse de bu teknolojiler henüz seri üretim aşamasında istenilen düzeyde yaygınlaşmamıştır (Eker vd., 2024; 54-55; *Lavieri & Olivera, 2021, s. 25-37*). Üstelik artırılan enerji yoğunluğunun güvenlik risklerine ve termal yönetim zorluklarına yol açması da potansiyel bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır (Islam, vd., 2023, s. 1-7). Yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryaların ısınma, şişme ve yangın riski, otomotiv endüstrisinde katı güvenlik ve test protokollerini gerektirmekte, bu nedenle üretim maliyetlerini ve AR-GE masraflarını da artırmaktadır (Rezvani, vd., 2018, s. 1274). Enerji yoğunluğuyla yakından ilişkili olan bir başka önemli değişken, bataryaların araç kütlelerine etkisi ve buna bağlı olarak sürüş menzilinın pratikte hangi seviyelere ulaştığıdır (Abdülvahitoğlu, Abdülvahitoğlu, 2023, s. 238). Elektrikli bir otomobilin batarya paketinin ağırlığı 300 kg ile 600 kg arasında değişebilmektedir; bazı lüks veya SUV segmentindeki modellerde bu rakam 800 kg seviyesini dahi bulabilmektedir (Machedon, 2020, s.14). Araç kütlelerinin artması hem otonom sürüş teknolojileri hem de fren, süspansiyon gibi güvenlik sistemlerinde ek mühendislik çözümlerini zorunlu kılmakta, dolayısıyla nihai tüketici fiyatlarını yükseltmektedir (Tören ve

Mollahasanoğlu, 2022, s. 1095). Öte yandan, batarya paketinin yerleşiminde araç tasarımının alt kısmını tercih eden otomobil üreticileri, ağırlık merkezini aşağıda tutarak yol tutuşunu ve güvenliği artırmayı hedeflese de yine de aerodinamik yapıdaki değişiklikler ve aracın genel ağırlığı, menzil ve performans arasında bir optimizasyon ihtiyacını beraberinde getirmektedir (Nasrallah, vd., 2015). Bu optimizasyon, üreticiler için karmaşık bir denklem anlamına gelmekte; zira sadece enerjiyi arttıran değil, aynı zamanda hafif ve güvenli materyaller arayan üretim süreçleri, elektrikli araçların batarya kaynaklı kısıtlarını aşmaya yönelik çok boyutlu bir AR-GE çabasını zorunlu kılmaktadır (Li, 2020, p. 104). Diğer yandan, batarya teknolojisinin düşük enerji yoğunluğu ve ağırlık dezavantajları, menzil konusunu önemli ölçüde etkilemektedir. Menzil kaygısı (range anxiety) olarak adlandırılan bu olgu, birçok tüketicinin elektrikli araç satın alma sürecinde geri adım atmasına neden olmaktadır (Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 119). Mevcut şartlar altında tek şarjla 400-500 km menzil sunan modeller olsa da fosil yakıtlı bir aracın tek depo ile 600-1000 km'ye varan mesafeler kat edebilmesi rekabet gücünü EA'lar aleyhine zayıflatmaktadır (Batmaz, 2023, s. 26). Bataryaların kütlece artması, teorik olarak daha fazla kapasite anlamına gelse de aracın verimliliğiyle ilgili kayıplar devreye girdiğinde gerçek hayatta beklenen performans tam olarak sağlanamayabilmektedir (Sendek-Matysiak, 2019). Bu çerçevede, batarya ağırlığının düşürülmesi, enerji yoğunluğunun yükseltilmesi ve soğutma sistemlerinin geliştirilmesi gibi çeşitli AR-GE yönelimleri, elektrikli araçların performans çitasını üst seviyelere taşımak için kritik önem taşımaktadır (MEB, 2021, s. 17). Her ne kadar batarya teknolojisindeki ilerlemeler umut vaat etse de kısa vadede bu dezavantajların tam anlamıyla ortadan kalkacağına dair kesin bir öngöründe bulunmak zordur (Li, vd., 2016, s. 537).

Elektrikli araç bataryalarında temel olarak lityum, kobalt, nikel, grafit ve mangan gibi hammaddeler öne çıkmakta; bu minerallerin bulunabilirliği, çıkarılması, rafine edilmesi ve nakliyesi gibi unsurlar ise küresel tedarik zincirlerinde çeşitli darboğazlara ve jeopolitik gerginliklere yol açmaktadır (Islam, vd., 2023, s. 5-7). Özellikle kobalt tedarikinde Demokratik Kongo Cumhuriyeti'nin küresel üretimin çok büyük bir kısmını elinde bulundurması, elektrikli araç batarya üreticilerini kaynak çeşitlendirmeye mecbur bırakmaktadır (Lavieri & Olivera, 2021, s. 15-18). Aynı şekilde lityum rezervlerinde Arjantin, Bolivya ve Şili gibi ülkelerin önemi artarken, bu bölgelerde madencilik faaliyetlerinin çevresel etkileri ve yerli halkların hakları gibi konular da tartışma gündemini meşgul etmektedir (Ustabaş, 2015; 273). Maden

çıkarma sürecindeki yüksek su tüketimi, kimyasal atıklar ve ekolojik tahribat endişeleri, yerel yönetimlerin ve sivil toplumun tepkisini çekebildiği gibi, elektrikli araçların “yeşil” olarak konumlandırılmasına da gölge düşürebilmektedir (Rong, vd., 2017, s.241). Hammadde tedarik zincirinin bu kırılgan yapısı, batarya maliyetlerinin öngörülebilirliğini de zayıflatmaktadır (Zhang, vd., 2018, p. 501). Lityum veya kobalt gibi kritik metallerin fiyatlarındaki küçük dalgalanmalar, batarya hücre fiyatlarına çarpan etkisiyle yansımakta ve elektrikli araç üreticilerinin kâr marjlarını baskılamaktadır (Abdülvahitoğlu, Abdülvahitoğlu, 2023, s. 231). Bu durum, batarya maliyetinin araç fiyatına olan payını yükseltirken, tüketiciler için de ilk satın alma maliyetini artıran bir faktör olmaktadır (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 225-229; Peterson, 2021, p. 37). Özellikle küresel ekonomik krizler, salgınlar veya jeopolitik gerilimler nedeniyle tedarik zincirlerinde yaşanan aksaklıklar, üretim bantlarında zaman zaman duraksamalara yol açabilmekte, bu da elektrikli araç pazarının genel büyüme hızını olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Tsiropoulos vd., 2018). Bu açıdan bakıldığında, hammadde çeşitliliği ve geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi, arz risklerini azaltan önemli stratejiler olarak görülmektedir (Ustabaş, 2015; 285). Maliyet meselesi sadece hammaddelerle sınırlı kalmayıp, batarya üretim sürecinde kullanılan ekipman, altyapı ve uzman iş gücü gibi bileşenleri de kapsamaktadır (Yu, vd., 2022). Lityum-iyon hücrelerin üretimi için gerekli katot, anot ve elektrolit malzemelerinin hassas bir şekilde birleştirilmesi, temiz oda koşulları, yüksek hassasiyetli makineler ve karmaşık kimyasal proses yönetimi gerektirir (Islam, vd., 2023, s.3-6). Bu noktada üretim hacminin artırılması (scale-up) yoluyla birim maliyetleri düşürme stratejisi öne çıksa da global ölçekte rekabetin giderek sertleştiği bir ortamda teknoloji liderliği yarışı da devam etmektedir (MEB, 2021, s. 19; Patel, 2019, p. 71). Özellikle Çin, Güney Kore ve Japonya merkezli şirketler, batarya üretim ve AR-GE faaliyetlerinde başı çekerken, Avrupa Birliği ve ABD, hammadde tedariki ve batarya teknolojilerinde stratejik bağımsızlık kazanmak adına farklı teşvik politikaları ve fonlama mekanizmaları geliştirmektedir (Li, vd., 2016, s. 539). Bu rekabetçi ortam, maliyetleri kısa vadede aşağı çekebilse de talebin aniden artması durumunda piyasada dengesizlikler oluşabilir. Örneğin, elektrikli araç bataryalarına yönelik talebin çok yükselmesi hâlinde nikel, kobalt ve lityum fiyatlarının kısa sürede sıçraması hem üreticileri hem de nihai tüketiciyi olumsuz etkileyebilir (Sendek-Matysiak, 2019). Dolayısıyla, elektrikli araçların batarya teknolojisiyle ilgili hammadde tedariği ve maliyet kısıtları, sadece otomotiv sektörünün değil, madencilik, lojistik, kimya ve

diplomasi gibi çeşitli alanların da kesişim noktasında yer almaktadır (Rezvani, vd., 2018, s. 1281). Bu durum, uzun vadeli bir stratejik planlama gerektirir: Yerli maden kaynaklarını keşfetme çabaları, geri dönüşüm tesislerine yatırım, hammadde tedarik anlaşmaları ve çevresel sürdürülebilirlik kriterlerine uygun madencilik uygulamaları gibi konular, elektrikli araç ekosisteminin sağlam bir zemin kazanması için kritik önemdedir (Lavieri & Olivera, 2021, s. 8-19). Aynı zamanda, üretim ölçeklerinin büyümesi ve inovasyon odaklı devlet teşvikleriyle batarya maliyetlerinin düşmesi, elektrikli araçların daha geniş kitlelere ulaşmasının önünü açabilir (Machedon, 2020, s. 14). Ancak bu süreçte, jeopolitik gerilimler, çevresel riskler ve piyasa dalgalanmaları gibi öngörülemeyen faktörlerin devreye girmesi, istikrarlı bir planlamayı hayli zorlaştırmaktadır (Ustabaş, 2015; 276). Lityum, kobalt gibi kritik minerallerin temini ve işlenmesi, küresel piyasalarda dalgalanmalara ve jeopolitik risklere açıktır (IEA, 2021, s. 52). Bu minerallerin sürdürülebilir ve etik madencilik uygulamaları çerçevesinde temin edilmesi, maliyet ve tedarik zinciri üzerinde ek baskı yaratır (Nasrallah, vd., 2015).

Elektrikli araç bataryalarında bir diğer önemli sınırlama, batarya ömrü (cycle life) ve geri dönüşüm kapasitesiyle ilgilidir. Lityum-iyon teknolojisi, belirli bir şarj-deşarj (döngü) sayısından sonra kapasite kaybına uğramakta, böylece araç menzili ve performansında düşüş görülmektedir (Yılmaz, vd., 2024,7-22; Hernandez, 2021, p. 132). Elektrikli araç bataryalarının kullanım ömrü ortalama 8-10 yıl olarak belirtilmektedir ancak kapasite kayıpları bu süre içerisinde belirgin olabilir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2021, s. 25). Kullanım şekline ve şarj edilme seçeneklerinin değişikliğine göre uzayacak veya kısalacak pil ömrü sonucunda atıl pillerin geri dönüşümü de ayrı bir tartışma konusu olmaktadır. Lityum-iyon pillerin geri dönüşüm oranı, genel anlamda %5 ila %20 arasında değişmekle birlikte, teknolojik gelişmeler ve artan geri dönüşüm yatırımları sayesinde bu oranın kademeli olarak artacağı öngörülmektedir (Harper et al., 2019, p. 254; Li et al., 2020, s. 37). Tipik olarak 1000'den 3000'e kadar çıkabilen şarj döngüsü ömürleri, kullanım koşulları, sıcaklık, şarj hızı ve batarya yönetim sistemi (BMS) gibi unsurlara bağlı olarak ciddi dalgalanmalar gösterebilmektedir (Köksal, vd., 2024, s. 92). Örneğin, sıklıkla hızlı şarj edilen bir bataryanın ısı yükü daha yüksek olur ve bu durum hücrelerdeki kimyasal bozunma hızını artırarak kapasite kaybını hızlandırır (Zhao vd., 2019, s. 11). Bu kayıp, önce menzilde küçük bir düşüşle başlasa da zamanla kümülatif bir etkiye dönüşerek aracın kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır (Rong, vd., 2017,

s.239). Batarya ömrü konusundaki bu kısıt, ikinci el pazarında da önemli soru işaretleri yaratmaktadır. İçten yanmalı motorlu araçlarda, motorun aşınması veya bakım masraflarının artması nispeten daha öngörülebilir ve makul düzeydeyken, elektrikli araçlarda batarya değişimi oldukça yüksek bir maliyet kalemi olarak görülmektedir (Kılınç, 2021, s. 23; Peterson, 2021, p. 39). Ömrü azalan bir bataryayı yenisiyle değiştirmek, toplam sahip olma maliyetini önemli ölçüde yükseltebileceği için ikinci el elektrikli araç piyasasında fiyat dalgalanmaları ve belirsizlik söz konusudur (Ustabaş, 2015; 275). Bu durum, tüketicilerin elektrikli araca geçiş konusundaki tereddütlerini artırabilmektedir. Öte yandan, bazı üreticiler, batarya kiralama veya garanti uzatma paketleri sunarak bu riski hafifletmeye çalışsa da, uzun dönemde batarya bozulması sorunu piyasada kalıcı bir endişe kaynağı olmaya devam etmektedir (Li, vd., 2016, s. 545). Batarya ömrü tamamlandığında, geri dönüşüm veya “ikinci hayat” (second life) uygulamaları devreye girmektedir. Örneğin, araçtan sökülen bir batarya, depolama kapasitesinin belirli bir kısmını yitirmiş olsa dahi sabit enerji depolama sistemlerinde (örneğin, güneş veya rüzgâr enerjisiyle entegre pil istasyonları) kullanılmaya devam edebilmektedir (Islam, vd., 2023, s. 5-11). Bu yaklaşım, atık miktarını azaltırken aynı zamanda batarya değer zincirinin ekonomik potansiyelini de genişletmektedir (MEB, 2021, s. 21). Ancak bu süreçte, kullanılacak hücrelerin seçimi, yeniden paketlenmesi, kalite kontrolü ve güvenlik testleri gibi aşamalar maliyet ve teknik zorluk yaratabilmektedir (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 224-228; Li, 2020, s. 108). Daha da önemlisi, kimyasal geri dönüşüm – yani lityum, kobalt, nikel gibi metallerin bataryadan ayrıştırılması ve yeniden kullanımı – günümüzde hem ekonomik hem de teknolojik olarak tam anlamıyla olgunlaşmış bir sistem değildir (Sendek-Matysiak, 2019). Geri dönüşüm tesislerinin kurulumu için yüksek sermaye ve ileri kimyasal proses uzmanlığı gerekirken, verimli bir geri kazanım oranına ulaşmak için AR-GE çalışmalarının sürmesi gerekmektedir (Zhang, vd., 2018, p. 506). Batarya geri dönüşümü ve ikinci hayat senaryoları, elektrikli araç ekosisteminin çevresel sürdürülebilirlik iddiasını güçlendirecek en kritik adımlardan biridir (Rezvani, vd., 2018, s. 1279). Eğer kullanılmayan bataryalar, uygunsuz şartlarda atık sahalarına terk edilirse, içerdiği kimyasalların doğaya salınması ve yeraltı sularına karışması gibi olumsuzluklar söz konusu olabilir (Abdülvahitoğlu, Abdülvahitoğlu, 2023, s. 231; Lavieri ve Olivera, 2021, s. 31-39). Bu nedenle, Avrupa Birliği başta olmak üzere birçok coğrafyada hem üreticilere hem de tüketicilere dönük yeni yasal düzenlemeler hazırlanmakta; batarya etiketleme, atık yönetimi, geri toplama

zorunluluğu gibi uygulamalar devreye sokulmaktadır (Tsiropoulos vd., 2018). Geri dönüşüm altyapısının yaygınlaşması, lityum ve kobalt gibi stratejik metallerin yeniden ekonomiye kazandırılmasını sağlayarak hammadde tedariği risklerini de azaltabilecektir (Machedon, 2020, s.16). Pek çok ülkede yaygın ve verimli pil geri dönüşüm tesislerinin eksikliği, lityum, kobalt ve nikel gibi stratejik metallerin ekonomiye yeniden kazandırılmasında potansiyel kayba neden olmaktadır (Reuter, 2020, s. 196). Geri dönüşüm altyapısı henüz tam gelişmediğinden, atık bataryalar çevresel riskler içerebilir (Ustabaş, 2015, s. 275-278). Sonuç olarak, batarya ömrü ve geri dönüşüm konuları, elektrikli araçların zayıf yönlerinden birini oluşturmakla birlikte, aynı zamanda yeni iş modelleri, teknolojik inovasyon ve çevre dostu çözümlerin de gelişmesine zemin hazırlayan kritik bir dönüşüm alanıdır (Tören ve Mollahasanoğlu, 2022, s. 1085). Batarya teknolojisindeki sınırlamalar hem üretim maliyetleri hem de menzil ve kullanım ömrü açısından elektrikli araçların rekabetçiliğini etkileyen temel unsurlardandır. Bu alanda süregelen AR-GE faaliyetleri, söz konusu zayıf yönlerin orta ve uzun vadede hafifletilmesini amaçlamaktadır (Ari, 2020, s. 199).

3.2.4. Uzun Şarj Süreleri

Elektrikli araçların (EA) yaygınlaşmasını kısıtlayan en belirgin sorunlardan biri, şarj sürelerinin geleneksel fosil yakıt ikmal süreçlerine göre daha uzun olmasıdır (Çakmak ve Çiçek, 2024). İçten yanmalı motorlu araçlarda (IYMA) yakıt doldurmak, istasyona girip çıkmakla birlikte çoğu zaman beş ila on dakikalık bir işlemi gerektirirken; aynı mesafe için elektrikli bir aracın bataryasını tam olarak doldurmak saatler alabilmektedir (Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 124; Lavieri ve Olivera, 2021, s. 5-17). İçten yanmalı araçlar birkaç dakika içinde depoyu tamamen doldurabilirken, elektrikli araçlar hızlı şarj istasyonlarında bile ortalama 30-40 dakikada ancak %80 şarj seviyesine ulaşabilmektedir (TÜBİTAK, 2020, s. 67). Şarj edilirken geçirilen bu uzun süre kullanıcı deneyimini zorlaştırabilir (Sevük, 2021, s. 30). Bu “zamansal dezavantaj”, özellikle uzun yolculuklarda ya da yoğun günlük rutinlere sahip sürücülerin gözünde elektrikli araçları ikinci plana itmektedir (MEB, 2021, s. 13). Buradaki temel fark, benzin veya dizel pompasında çok hızlı gerçekleşen akaryakıt akışı ile elektrik enerjisinin bataryada kimyasal enerjiye dönüştürülmesini sağlayan şarj süreci arasındaki fiziksel ve kimyasal sınırlamalardan kaynaklanmaktadır (Zhang, vd., 2018, p. 502). Bunu daha somut bir şekilde ifade etmek için tipik bir örnek vermek

mümkündür. 50 litrelik bir yakıt deposu, ortalama 40 litre/dakika akış hızına sahip bir benzin pompası aracılığıyla yaklaşık 1,25 dakikada doldurulabilir; bekleme süresi ve ödeme işlemleriyle birlikte bu süre sıklıkla 5-10 dakikayı geçmez (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 231-234). Buna karşılık 50 kWh büyüklüğünde bir batarya kapasitesine sahip elektrikli aracın, 7 kW gücündeki bir AC şarj cihazıyla tamamen şarj olması, ideal koşullarda yaklaşık 7-8 saat sürmektedir (Sendek-Maysiak, 2019). 22 kW'lık şarj istasyonlarında bu süre 2-3 saate kadar düşebiliyorsa da geleneksel “yakıt doldur ve git” alışkanlığına sahip sürücüler için bu rakamlar hâlâ yüksek gözükmemektedir (Li, vd., 2016, s. 545). Daha hızlı DC şarj istasyonlarında (örneğin 50 kW veya 100 kW) 30-40 dakika aralığında dolum yapabilmek elbette mümkündür, ancak istasyonun bulunabilirliği, ağın yaygın olmaması, şarj sırası bekleme ve bataryanın ısı yönetimi gibi faktörler, pratikte bu rakamların da artmasına sebep olabilmektedir (Zhao vd., 2019, s. 22; Abdülvahitoğlu, Abdülvahitoğlu, 2023, s. 231-232). Bu zamansal dezavantaj, sadece bireysel kullanıcılara yönelik bir problem değil; aynı zamanda ticari filolar, lojistik şirketleri ve taksi işletmeleri gibi süreklilik gerektiren faaliyetlerde daha da belirgin hâle gelmektedir (Islam, vd., 2023, s. 12-18). Örneğin bir kargo şirketinin günde birkaç kez depoya uğrayıp aracını yakıtla doldurması yerine, elektrikle dayalı filonun her sefere çıkmadan önce uzun şarj bekleme süreçleri yaşaması operasyonel planlamada zorluklar doğurmaktadır (Tsiropoulos vd., 2018). Bu noktada, işletmeler her ne kadar akıllı rota planlama ve gecelik şarj stratejileriyle bu sorunu azaltmayı hedeflese de gündüz vakti acil teslimatlar veya ekstra sefer gerektiren durumlarda uzun şarj süreleri dezavantajı daha da belirginleşir (Rezvani, vd., 2018, s. 1277). Dahası, yüksek güçlü (örneğin 150 kW üzeri) hızlı şarj noktalarının maliyeti ve altyapı gereksinimleri yüksek olduğundan, birçok bölgede bu istasyonların sayısı kısıtlı kalmakta, dolayısıyla yüklenme dönemlerinde bekleme süreleri ve kuyruklar oluşarak zaman dezavantajını pekiştirmektedir (Lavieri ve Olivera, 2021, s. 10-14). Matematiksel bir açıdan yaklaşılabilecek olursa, 45 kWh'lık bir batarya paketini %20'den %80'e kadar doldurmak için 50 kW DC şarj istasyonunda gereken süre, $\Delta t = \frac{(0.8-0.2) \times 45 \text{ kWh}}{50 \text{ kW}} = \frac{27 \text{ kWh}}{50 \text{ kW}} = 0.54$ saat, yani yaklaşık 32 dakikadır (Çakmak ve Çiçek, 2024, s. 45). Bu, uzun yolculuklar için nispeten tolere edilebilir bir süredir; ancak istasyon sayısının kısıtlı olduğu veya birkaç sürücünün aynı anda şarj talep ettiği senaryolarda sıraya girmek gerekebilir. Ayrıca, batarya %80'den sonra akım ve gerilim değerleri korunması

gerektiği için şarj hızı doğal olarak düşer, yani son %20'lik kısım daha uzun sürede tamamlanır (Boretti, 2020, s. 85-88). Bu nedenle pratikte, “0’dan %100’e şarj” yerine “%20’den %80’e hızlı şarj” ölçütü daha yaygın olarak kullanılır (Köksal, vd., 2024, s. 113). Tüm bunlar, geleneksel yakıt dolumuna kıyasla hâlâ belirgin bir zaman farkının olduğu gerçeğini değiştirmemektedir (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 238). Zamansal dezavantaj hususu, tüketicilerin elektrikli araçlara geçiş kararını doğrudan etkilemekte ve “menzil kaygısı” (range anxiety) kadar önemli bir bariyer olarak görülmektedir (Batmaz, 2023, s. 32). Menzil ne kadar uzun olursa olsun, şarj etme eyleminin yarattığı ek süre ve planlama ihtiyacı, konvansiyonel araçların anında yakıt doldurma rahatlığına alışkın kullanıcılar açısından bir konfor kaybı şeklinde algılanmaktadır (Sendek-Matysiak, 2019). Bunun önüne geçmek için hükümetler, elektrik dağıtım şirketleri ve otomotiv firmaları iş birliğiyle hem şarj altyapısının yaygınlaştırılmasını hem de şarj teknolojisinin hızlanmasını amaçlayan çeşitli teşvik ve AR-GE programları yürütmektedir (MEB, 2021, s. 14). Yine de halihazırdaki teknoloji seviyesi ve maliyet dengesi göz önüne alındığında, geleneksel yakıt ikmal süresine yakın hızda ve yaygınlıkta bir şarj ağı oluşturmanın zaman alacağı söylenebilir (Tören ve Mollahasanoğlu, 2022, s. 1088). Zira her ne kadar 350 kW’a kadar çıkan ultra hızlı şarj istasyonları konsept olarak geliştirilmiş olsa da bunların maliyeti ve şebekeye getirdiği ek yük dikkate alındığında, yakın gelecekte her şehir içi noktada yaygın olarak görülmeleri iyimser bir bakış açısı olacaktır (Zhao vd., 2019, s. 22; Abdülvahitoğlu, Abdülvahitoğlu, 2023, s. 236-238).

Uzun şarj sürelerinin ortaya çıkardığı zorluklardan biri de kullanıcıların çoğu zaman ev veya ofis gibi ortamlarda “yavaş” sayılabilecek kurulumlarla bataryalarını doldurmak zorunda kalmalarıdır (Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 122). Birçok kullanıcı, ev veya ofis garajında şarj etmek isteyebilir ancak standart şebeke prizlerinde bir tam şarj 8-10 saati bulabilmektedir (TMMOB, 2024, s. 5). Elektrikli araç sahiplerinin büyük bir kısmı günlük kullanımda, gece boyunca aracı evde veya mesai süresince ofiste şarj etmeyi tercih etmektedir; zira bu yöntemde araç bekleme halindeyken şarj gerçekleşir ve sürücü, konvansiyonel yakıtta olduğu gibi ekstrasından “istasyona gitme” eylemine zaman harcamaz (Lavieri & Olivera, 2021, s. 40-48). Ne var ki, hane içi elektrik hatlarının çoğu “seviyeli şarj” (Level 1 veya Level 2) olarak adlandırılan, 2 kW ila 7 kW aralığında şarj gücü sunabilmekte, bu da 50 kWh’lik bir bataryanın 8-25 saat arasında değişen sürede dolmasına yol açmaktadır (Li, vd., 2016, s. 544). Dolayısıyla, ev/işyeri şarjı genellikle “bekleme süresinin şarj için kullanılması”

ilkesine dayanan bir strateji olsa da bazen araç kullanıcısının plansız veya acil durumları için uygun değildir (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 227). Matematiksel bir perspektifle incelendiğinde, 32 A'lık bir tek fazlı devreyle (7,4 kW) çalışan bir ev tipi şarj istasyonunda, 60 kWh kapasiteli bir bataryayı %0'dan %100'e yaklaşık $\Delta t = \frac{60\text{kWh}}{7.4\text{kW}} \approx 8.1$ saat içinde doldurmak mümkündür (Köksal, vd., 2024, s. 97). Bu süre, araç gece boyunca park halindeyken tolere edilebilir olmakla birlikte, örneğin gün içinde sık seyahat eden kullanıcılar için elverişli değildir (MEB, 2021, s. 16). Benzer şekilde, ofis şarj istasyonlarında da güç genellikle 11 kW ila 22 kW aralığında sınırlı olduğu için, yarım iş günü (4 saat) içinde bataryanın %40-50'lik kısmı doldurulabilmektedir (Rong, vd., 2017, s.247). Böylece, ev veya ofis şarjı çoğunlukla “tam dolum” yerine “kısmi dolum” stratejileriyle işletilmekte, sürücüler için ek planlama gerektirmektedir (Islam, vd., 2023, s. 5-8). Uzun şarj sürelerinin ev ve ofis ortamlarında yarattığı bir diğer zorluk, kullanıcıların sosyal hayat ve iş programı üzerinde meydana getirdiği dolaylı maliyettir (Sendek-Matysiak, 2019). Zira, elektrikli araç sahipleri, “her gece mutlaka takmak” veya “her öğle arasında şarja takmak” gibi yeni rutinelere adapte olmak durumundadır. Bu, bazıları için kullanışlı bir çözüm olabilse de (çünkü araç boşta dururken şarj ediliyordur), düzenli şekilde priz bulamayan veya yeterli kapasitede park alanına erişimi olmayan kullanıcılar için önemli bir handikaptır (Tsiropoulos vd., 2018). Kentsel bölgelerde apartman sakinlerinin ortak park alanlarında şarj noktası kurulumuna yönelik teknik ve yasal engeller, site yönetimiyle yapılan anlaşmalar, ek maliyetler gibi etkenler, elektrikli araç sahipliğini zorlaştırmaktadır (Machedon, 2020, s. 18). Ayrıca, ofis şarjı için gereken altyapının da ek kurulum ve işletim maliyeti gerektirmesi, işletmelerin bu yatırımı yapmak istemesi durumunda karar süreçlerini uzatabilmektedir (Ustabaş, 2015; 279). Uzmanlar, ev ve ofis şarjının sorunsuz işlemesi hâlinde uzun şarj sürelerinin kişi bazında büyük bir problem olmaktan çıkabileceğini, ancak bunun yaygın bir toplumsal dönüşümü gerektirdiğini vurgulamaktadır (Abdülvahitoğlu, Abdülvahitoğlu, 2023, s. 233-234). Yani, bireylerin çalışma saatlerinin, konut projelerinin ve yerel yönetimlerin şarj altyapısına yaklaşımının eşgüdümlü olması gerekir (Batmaz, 2023, s. 32). Özellikle megakentlerde, kamuya açık hızlı şarj istasyonlarının veya büyük otoparkların yeterince yaygın olmaması hâlinde, ev ve ofis şarjına olan bağımlılık artacak; bu da uzun şarj süreleri nedeniyle kullanılan zamanı yönetme meselesini kritik hâle getirecektir (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 227-229). Bu durum, elektrikli araç

kullanıcılarında sosyal ve davranışsal bir değişimi gerekli kılmakta; “doldur ve devam et” yerine, “aracı park ettiğimde zaten şarj oluyor” bilinci yerleştiğinde, uzun şarj süreleri pratikte tolere edilebilir hâle gelebilmektedir (Li, vd., 2016, s. 552).

Uzun şarj süreleri sorununa karşı geliştirilen en yaygın çözümlerden biri de hızlı şarj (DC fast charging, HPC) teknolojileridir. 50 kW’tan başlayıp 350 kW gibi daha yüksek değerlere kadar çıkan bu sistemler, elektrikli aracın bataryasını %0’dan %80’e kadar ortalama 30-40 dakikalık bir sürede doldurabilmektedir (Köksal, vd., 2024, s. 98). Fakat burada karşımıza çıkan en önemli tartışma, hızlı şarjın batarya ömrüne ve dolayısıyla araç performansına uzun vadede ne gibi olumsuz etkiler getirebileceğidir (Boretti, 2020, s. 87-90). Sürekli hızlı şarj kullanımı, batarya ömrünü kısaltabileceği gibi yüksek enerji talepleri oluşturur (Nasrallah, vd., 2015). Bataryalar, yüksek akım ve gerilim altında çalıştıklarında daha fazla ısınmakta, lityum-iyon hücrelerin içindeki elektrokimyasal reaksiyonlar hızlanmakta, dolayısıyla elektrotların bozulma hızı artabilmektedir (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 233-241). Bu olumsuz etkiyi nicel olarak gözlemlemek için bir modelleme çalışmasına bakılabilir. Örneğin, 1000 döngülük bir batarya ömrü (tam şarj-deşarj olarak tanımlanan cycle sayısı) referans alındığında, sürekli %80 hızlı şarj (örnek: 100 kW üstü) kullanan bir elektrikli araç bataryasının ömrü %15 ila %25 oranında kısalabilmektedir (Ustabaş, 2015; 290). Bu da normalde 5 yıl dayanması beklenen bir bataryanın 4 yıla inmesi veya aynı süre içinde kapasite kaybının daha yüksek seviyelerde seyretmesi anlamına gelmektedir (Tören ve Mollahasanoğlu, 2022, s. 1082-1083). Formülasyon düzeyinde, batarya kapasite kaybı $\Delta C \approx k \times I^m \times t$ gibi kabaca parametrize edilebilir; burada I hızlı şarj akımını, t şarj süresini, k ve m ise deneysel katsayıları ifade eder (Sendek-Matysiak, 2019). Yüksek akım (I) değerleri, ΔC yani kapasite kaybını hızlandırdığından, her ne kadar sürücü kısa vadede zaman kazansa da uzun vadede batarya dayanıklılığı daha çabuk gerileyecektir (Batmaz, 2023, s. 31). Hızlı şarjın batarya ömrü üzerindeki etkisi, aslında batarya yönetim sistemi (BMS), soğutma altyapısı ve pil kimyasına da bağlıdır (Islam, vd., 2023, s. 11-15; Lavieri ve Olivera, 2021, s. 50). Nikel-kobalt-alüminyum (NCA) veya nikel-kobalt-mangan (NCM) katotlu hücrelerde yüksek hızlı şarj akımına karşı duyarlılık değişiklik gösterebilir. Bazı araştırmalar, belirli bir seviyeyi aşmayan hızlı şarj akımı ve uygun termal yönetim sağlandığında kapasite kaybının %10-%10-%10 seviyesinde kalabileceğini öne sürerken; bazı çalışmalar, agresif şarj protokollerinde bu oranın %25-%30’lara çıkabileceğini belirtmektedir (Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 118). Bu tutarsızlık, farklı üreticilerin hücre kimyası, soğutma

sistemleri ve batarya yönetim yazılımlarında uyguladığı koruma mekanizmalarından kaynaklanmaktadır (Abdülvahitoğlu, Abdülvahitoğlu, 2023, s. 239). Yine de genel anlamda, hızlı şarjın uzun vadede batarya sağlığına zarar verebileceği ve araç sahibine ek maliyet olarak yansıyabileceği konusunda bir fikir birliği mevcuttur (Rong, vd., 2017, s.240). Örneğin, tam bir hızlı şarj istasyonuna bağımlı bir taksi filosu sürekli 100 kW ve üzeri değerlerde akımla şarj edilirse, üç yılda ortalama kapasite kaybının %20 ile %25 aralığında olabileceği tahmin edilmektedir (Li, vd., 2016, s. 537). Bu, sürücülerin menzillerinin beklenenden daha hızlı düşmesiyle sonuçlanacak ve belki de batarya değiştirme gereksinimini öne çekecektir (Li, vd., 2016, s. 552). Dolayısıyla, uzun şarj sürelerini aşmak için hızlı şarj istasyonlarını yoğun şekilde kullanmak, bir yandan pratiklik sağlarken bir yandan da batarya dayanıklılığını törpüleyen bir ikilem yaratır (Köksal, vd., 2024, s. 88). Uzun şarj süreleri sorununa karşı ileri teknoloji çözümleri arasında yeni katot-anot malzemeleri, katı hâl (solid-state) elektrolitler ve daha gelişmiş batarya yönetim sistemleri gösterilmektedir (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 238, s. 71; MEB, 2021, s. 17). Teorik olarak, katı hâl bataryalarda daha hızlı şarj yapılabilmesine rağmen, hâlihazırda seri üretim için çok yüksek maliyet, düşük üretim hacmi ve güvenlik testleri gibi engeller söz konusudur (Rezvani, vd., 2018, s. 1275). Diğer yandan, sürücülerin enerji dolumunu her zaman hızlı şarjla değil, çoğunlukla yavaş veya orta seviyede şarjla yapıp, ihtiyaç halinde hızlı şarjı devreye sokmaları batarya ömrü açısından daha sağlıklı bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Sendek-Matysiak, 2019). Şarj süresi problemi, kullanıcı konforunu doğrudan etkileyen ve elektrikli araçlara yönelik menzil kaygısını tetikleyen önemli bir zayıf noktadır. Ancak yeni nesil hızlı şarj teknolojileri ve batarya AR-GE faaliyetleriyle bu sorunun da aşamalı olarak çözülmesi öngörülmektedir (Ari, 2020, s. 193). Günün sonunda, uzun şarj süreleri sorununu hızlı şarjla gidermek isteyen kullanıcılar, batarya ömrü üzerinde olumsuz bir etkiyi göze alarak zaman kazanır; ancak bu denge çeşitli faktörlere (aracın kullanım senaryosu, batarya kimyası, şarj istasyonu altyapısı vb.) bağlı olduğundan, her kullanıcıya uygun tek bir “optimal çözüm” den söz etmek henüz mümkün değildir (Çakmak ve Çiçek, 2024, s. 46; Lavieri & Olivera, 2021, s. 50-55).

3.2.5. Toplumsal ve Psikolojik Engel: Menzil Kaygısı (Range Anxiety)

Elektrikli araçlar (EA), çevresel faydaları ve enerji verimliliği potansiyeliyle son yıllarda uluslararası otomotiv sektörünün en dikkat çekici yeniliklerinden biri olsa

da toplum genelinde “menzil kaygısı” (range anxiety) olarak bilinen endişe, bu araçların yaygın kabul görmesinde belirgin bir bariyer oluşturmaktadır (Machedon, 2020, s. 19). Geleneksel içten yanmalı motorlu araçlar (IYMA) ile kıyaslandığında, elektriğin bir yakıt olarak daha az erişilebilir veya daha uzun sürede elde edilebilir olması, kullanıcıların sürüş planlamasında çeşitli değişiklikleri zorunlu kılar (Rezvani, vd., 2018, s. 1278). Araç sahipleri, içten yanmalı motorlu araçlarda yakıt ikmali yapmaya alışmış, istasyonların yaygınlığı sayesinde menzil konusunu pek düşünmemiştir. Elektrikli araçlarda ise menzil ve şarj süresi kaygıları alışkanlıkları değiştirmeyi zorlaştırır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2020, s. 14). Bu zorunluluk, otomobilin kullanıcı deneyimini şekillendiren bir dizi algısal ve davranışsal faktörle birleştiğinde, elektrikli araçların menzile ilişkin performanslarına dair pek çok spekülasyon ve önyargının ortaya çıkmasına yol açmaktadır (Nasrallah, vd., 2015). Kullanıcı alışkanlıkları bu noktada belirleyici bir etken olmaktadır; zira kullanıcılar, senelerdir benzin veya dizel yakıtlı araçların sağladığı “kısa sürede yakıt doldurma” ve “geniş ağda istasyon bulabilme” rahatlığına alışık olduklarından, yeni bir enerji tüketim ve ikmal modeline geçişte direnç gösterebilmektedir (Lavieri & Olivera, 2021, s. 15-20). Elektrikli Araçlar kullanıcı deneyimini, geleneksel yakıt istasyonlarından tamamen farklı bir planlama gereksinimi doğurmaktadır. Örneğin, uzun yol seyahatlerinde kullanıcıların yoğun şekilde “şarj istasyonu nerede?” sorusuyla ilgilenmesi, menzil kaygısını besleyen temel faktörlerden biridir (MEB, 2021, s. 19). Günlük ortalama sürüş mesafesinin 40-50 km civarında olduğu göz önüne alındığında (Machedon, 2020, s. 21), aslında çoğu EA modelinin günlük kullanım için fazlasıyla yeterli menzil sunduğu söylenebilir. Ancak birçok sürücü, özellikle geçmişte benzinli veya dizel araçlar kullanmışsa, uzun menzilli yolculuklarda nadiren görülen durumlar için bile sürekli “ya yolda kalırsam?” endişesi taşımaktadır (Batmaz, 2023, s. 25). Bu çerçevede, “menzil kaygısı” belirli bir teknik kısıttan ziyade, kullanıcı alışkanlıklarının ve gelecek endişesinin bir türevi olarak da değerlendirilebilir. Kullanıcıların sürüş rutinlerinde büyük oranda değişikliğe gerek duyulmamasına rağmen, algısal bazda yaratılan “yetersiz menzil” imajı, elektrikli araç satışlarını zora sokan bir unsur hâline gelmiştir (Thorhauge, vd., 2024, s. 1-23). Matematiksel bir bakışla, birçok EA üreticisi günlük kullanıma uygun olduğunu vurgulamak amacıyla, 300 km ila 500 km arasında değişen menzil değerlerini pazarlamaya devam etmektedir (Kuzu vd., 2024: 376). Bu menzil aralığı, Günlük Kullanım Mesafesi (GKM) ile karşılaştırıldığında çoğu sürücünün ihtiyacını fazlasıyla karşılar: Menzil > GKM. Yani,

500 km > 40 km gibi bir denklem, teorik olarak kullanıcının hemen her günkü s r   ihtiyacının çok üstünde yer alır (Li, vd., 2016, s. 548). Ancak kullanıcı psikolojisi, “beklenmedik olaylar” ve “acil durumlar” için de araçta yeterli menzil bulundurmaya isteyebilir. Benzin istasyonuna 10 dakikada uğrayarak tekrar yola devam etme rahatlığı, bu kaygıyı hafifletirken, elektrikli araçta benzer durumlarda şarj süresinin daha uzun olması, belirsizlik algısını yükseltir (Tsiropoulos vd., 2018). Bu dinamik, menzil kaygısının araç performansı veya menzil do rulu una dair şüpheleri değil, doğrudan kullanıcı psikolojisini yansıtan bir direnç olduğunu göstermektedir (Abd lvahito lu, Abd lvahito lu, 2023, s. 232). Günümüzde hızlı şarj istasyonlarının artması, batarya teknolojilerinin gelişmesi gibi etkenler bu kaygıyı azaltabilecek önlemler olarak görülmektedir (Batmaz, 2023, s. 28). Öte yandan, kullanıcı alışkanlıklarının de i iminde zaman önemli bir faktördür. Tarihsel olarak, otomobillerin yakıt deposu b y kl   ve yakıt istasyonu a ı, sürücülerin “yakıtlarla ilgili endişe”yi neredeyse unuttuğu bir konfor sunmuştur (Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 121). Elektrikli araçlar ise bu konfor alanını kısmen yeniden düzenlerken, haftada birkaç defa istasyona gitmek yerine evde veya ofiste düzenli şarj etme alışkanlığı geliştirme ihtiyacı doğurur (Zhou ve Li, 2018, s. 470). Dolayısıyla menzil kaygısı, sadece teknik bir sorun değil; aynı zamanda sosyokültürel bir dönüşümün nasıl y netilece iyle de ilgilidir (Cao, 2020, p. 143). Yine de çoğu araştırma, insanların zamanla yeni şarj rutini ve planlamasına alıştı ını, hatta bir süre sonra menzil kaygısının fiilen ortadan kalktığını göstermektedir (Batmaz, 2023, s. 30). Böylelikle, güçlü negatif algıya rağmen, elektrikli araçların günlük kullanımdaki gerçekçi senaryolarda sunduğu menzilin büyük oranda yeterli olduğu s ylenabilir (Lavieri & Olivera, 2021, s. 23-27).

Menzil kaygısını tetikleyen bir diğer faktör, toplumdaki eksik veya yanlış bilgilendirmedir. Halk arasında elektrikli araçların “hiçbir zaman uzun yol yapamayacağı” veya “ zellikle kış şartlarında çok fazla menzil kaybedece ı” gibi genellemeler dola maktadır (Sevük, 2021, s. 28-31). Bu tür algılar, satış rakamları ve yaygınla ma hızını olumsuz etkilemektedir (Nasrallah, vd., 2015). Medyada ve internet ortamında yer alan kulaktan dolma bilgiler, bazen elektrikli araç teknolojisinin gerçek potansiyelini yansıtmaktan uzaktır (Köksal, vd., 2024, s. 86). Örneğin, düşük kapasiteli ilk nesil bataryalı elektrikli araçların menzilin sadece 100-150 km olması, bu teknolojinin “hiçbir zaman yeterli menzile ula amayaca ı” gibi bir kanıya dönüşebilmektedir (Baysal, 2021, s. 12). Oysa güncel batarya teknolojisiyle 400-600

km bandını yakalayan, bazı üst segmentlerde 600 km'yi bile aşan modellerin bulunduğunu gösteren veriler, doğru kaynaklarca paylaşılmadığında bu yanlış algı derinleşir (Köksal, vd., 2024, s. 98). İnsanların sosyal medya üzerinden duyduğu hikâyeler veya abartılı negatif deneyim paylaşımları, “her an yolda kalma” korkusunu besleyerek menzil kaygısını büyütür (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 240-241). Eksik veya yanlış bilgilendirmenin bir diğer boyutu, menzil değerlerinin test koşullarıyla gerçek sürüş koşulları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır (Batmaz, 2023, s. 32). Birçok otomobil üreticisi, Avrupa’da WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure) veya ABD’de EPA (Environmental Protection Agency) standartlarına göre ölçülen menzil rakamlarını pazarlamaktadır (Tury, 2019, s. 114). Bu prosedürler, belirli ısı ve hız profillerinde yapılır; dolayısıyla sıcaklık, yol eğimi, sürüş tarzı, klima kullanımı veya bagaj ağırlığı gibi gerçek hayatta sık rastlanan değişkenler, test değerlerinden düşük bir menzille karşılaşılmasına neden olabilir (Rong, vd., 2017, s.234). Kullanıcılar, “broşürde 400 km menzil yazıyor ama ben 300 km’yi geçemiyorum” diye düşündüğünde, menzil kaygısı yeniden doğrulanmış olur (Cao, 2020, p. 145). Oysa konvansiyonel benzinli veya dizel araçlarda da fabrika tüketim değerlerinin (örneğin 5 L/100 km) gerçekte çoğu kez aşıldığı bilinse de köklü alışkanlıklar nedeniyle bu fark aynı düzeyde bir endişe yaratmaz (Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 121). Bilgi kirliliğinin giderilmesi, elektrikli araçlara yönelik kamuoyu algısını şekillendiren kritik adımlardan biridir (Lavieri ve Olivera, 2021, s. 8-11). Araç üreticileri, kamu kurumları ve sivil toplum kuruluşları, düzenli bilgilendirme kampanyaları düzenleyerek menzil konusundaki yanlış fikirleri düzeltmeye çalışmalıdır. Örneğin, “ortalama şehir içi hızlarda ve günlük kullanımda bir elektrikli aracın menzilin genellikle kullanıcı ihtiyacını aştığı” gerçeği vurgulanmalıdır (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 233). Şarj altyapısının eksikliği, günlük rutinlerde değil, çoğunlukla uzun yol seyahatlerinde sorun yaratabileceği gerçeği kamuoyunda doğru şekilde anlatılmalıdır (Köksal, vd., 2024, s. 85). Ayrıca, enerji tüketimini artıran klima veya ısıtma sisteminin ne kadar menzil kaybına yol açabileceği net ve şeffaf verilerle paylaşılmalıdır (MEB, 2021, s. 20). Eksik veya yanlış bilgilendirmenin yarattığı bir başka sıkıntı, ikinci el elektrikli araç piyasasında görülebilir. Batarya ömrüne dair belirsizlikler, “menzil kaybı” korkusuyla birleştiğinde ikinci el fiyatlarını etkileyebilir ve potansiyel alıcıları uzaklaştırabilir (Rezvani, vd., 2018, s. 1278). Sonuçta, “menzil kaygısı” sadece otomobil piyasası ve tüketicilerin tercihini değil, elektrikli araçların çevresel hedefler doğrultusunda benimsenme hızını da yavaşlatır

(Nasrallah, vd., 2015). Bilimsel raporların ve deneysel verilerin yaygın biçimde erişilebilir kılınması, farklı koşullarda EA menziline hangi sınırlar içinde değişebileceğini gerçekçi bir çerçeveye oturarak, kullanıcıların spekülasyonlara dayalı endişelerini azaltır (Baysal, 2021, s. 15).

Menzil kaygısının bir diğer boyutu, “güvenilirlik endişesi” kavramı ile ilişkilidir. Sürücüler, yolculuk esnasında aniden şarjın tükenmesi veya bir arıza durumunda destek alamama korkusuyla elektrikli araçlara temkinli yaklaşır (Thorhauge, vd., 2024, s. 5-12). Bu durum kısmen eksik şarj altyapısından kaynaklansa da sadece istasyonların azlığıyla açıklanamaz. Kullanıcılar aynı zamanda mevcut istasyonların çalışmama ihtimali, ödeme sistemlerindeki karmaşa veya fiş-uyumluluk sorunları gibi faktörleri de güvenilirlik endişesi kapsamına dâhil etmektedir (Rong, vd., 2017, s.238). Örneğin, uzun bir yolculukta sürücü, bir şarj istasyonuna ulaştığında “istasyon bozuk çıkar mı, dolu olabilir mi, sıra var mı?” gibi belirsizliklerle karşı karşıya kalmak istemez. Bu da menzilin teknik olarak yeterli olsa bile psikolojik düzeyde yetersiz algılanmasına neden olabilir (Lavieri ve Olivera, 2021, s. 9-10). Elektrikli araç güvenilirliği sadece şarj altyapısı değil, araçların menzil göstergesine duyulan güvensizlikle de bağlantılıdır (Zhou ve Li, 2018, s. 430). Sürücüler, gösterge panelinde yazan “kalan mesafe” değeriyle gerçek dünya sürüşünün her zaman örtüşmemesi durumunda tedirginlik yaşayabilir. Soğuk hava, dik yokuşlar, agresif sürüş stili veya ani hızlanmaların menzil göstergesini hızla düşürdüğü görülünce, “acaba hesapladığımdan daha erken mi şarj bitecek?” endişesi ortaya çıkar (Cao, 2020, s. 146). Bu durum, yazılım ve algoritma düzeyinde hassas ayarlamalar gerektirir; zira batarya durumu (state of charge, SOC) ve menzil tahmini (range estimate) gibi parametreler, sürüş koşullarına göre adaptif şekilde güncellenmelidir (Nasrallah, vd., 2015). Bazı yeni modellerde bu algoritmalar daha gelişmiş olsa da ikinci el veya eski modellerde kullanıcıların karşılaştığı sapmalar menzil kaygısını güçlendirir (Rezvani, vd., 2018, s. 1278). Güvenilirlik endişesinin bir başka açısı da uzun süreli yolculuk senaryolarında daha fazla planlama gerekliliğidir. Sürücüler, yola çıkmadan önce güzergâh üzerindeki şarj istasyonlarını araştırmak, alternatif yollar belirlemek gibi fazladan zaman harcayan bir dizi önlem almak zorunda kalabilir. İçten yanmalı araçlarda ise böylesi bir planlama çoğu zaman ihtiyaç duyulmayacak kadar basit kalır (Thorhauge, vd., 2024, s. 2-17). İstasyon sayısının görece az ve düzensiz konumlandığı ülkelerde veya bölgelerde ise bu durum katlanarak artar. Örneğin, büyük aralıklarla istasyon bulunmayan uzun otoban segmentlerinde, sürücüye kalandan daha uzun bir

mesafe söz konusu olduğunda menzil kaygısı adeta güvenlik kaygısına dönüşebilir (Köksal, vd., 2024, s. 99). Bu bağlamda, kullanıcılar menzil göstergesinin doğruluğuna tam olarak güvenemediğinden, araç menzilin %70-80'ini aşan yolculuklar yapmaktan kaçınabilmektedir (Köksal, vd., 2024, s. 91). Ancak bu tabloda, menzil kaygısına karşı bazı olumlu eğilimler de mevcuttur. Yeni nesil mobil uygulamalar ve navigasyon sistemleri, sürücülerin anlık batarya durumunu, yakın şarj istasyonu konumlarını ve tahmini şarj zamanını gösterebilmektedir (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 238-240). Ayrıca araç içi yazılımlar, hava durumuna, rota eğimine ve hız profiline göre dinamik menzil hesabı yaparak kullanıcıya daha gerçekçi tahminler sunabilir (Cao, 2020, p. 148). Bu iyileştirmeler, güvenilirlik endişesini hafifletecek önlemlerin örnekleridir. Menzil kaygısı, altyapı yatırımları, teknolojik iyileştirmeler ve doğru bilgilendirme kampanyalarıyla azaltılabilecek bir zayıf yön olarak ortaya çıkmaktadır. Bu kaygının giderilmesi, kullanıcıların elektrikli araçlara geçiş hızını doğrudan etkilemektedir (Ari, 2020, s. 198). Uzmanlar, menzil kaygısının zamanla azalacağı, şarj istasyonlarının yaygınlaşması ve araç yazılımlarının gelişmesiyle bu endişenin ortadan kalkacağı konusunda hemfikirlerdir (Rong, vd., 2017, s.241). Fakat kısa vadede, eksik altyapı ve toplumsal önyargıları göz önünde bulundurulduğunda, “menzil kaygısı” elektrikli araçların zayıf yönlerinden biri olmaya devam edecektir (Nasrallah, vd., 2015).

3.3. Fırsatlar (Opportunities)

Elektrikli araç pazarının hızla genişlemesinde, teknoloji ve pazar dinamikleri kadar makroekonomik ve politik faktörler de rol oynamaktadır. Bu bölümde ele alınan **fırsatlar**, elektrikli araç sektörü ve paydaşları için önemli kazanımlar sunmaktadır.

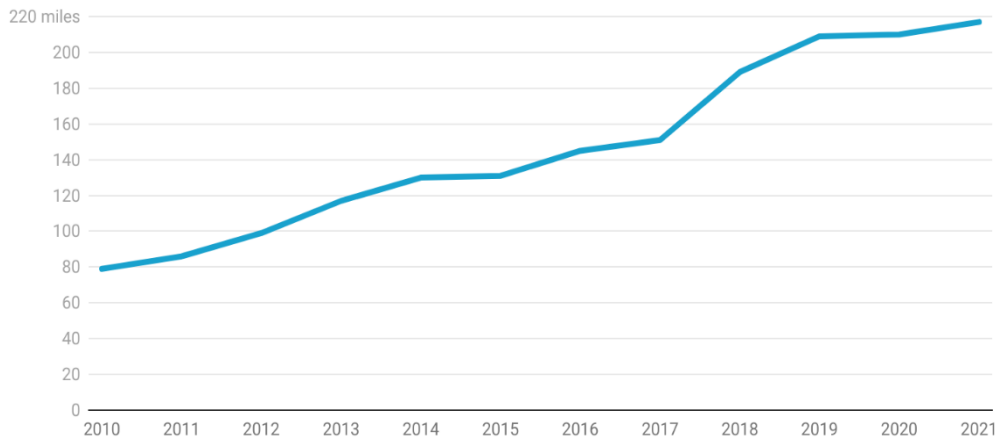
3.3.1. Hızla Gelişen Teknoloji ve Düşen Batarya Maliyetleri

Elektrikli araçlar (EA), küresel otomotiv endüstrisinde son yıllarda yaşanan dönüşümün önemli bir temsilcisi haline gelmiştir. Fosil yakıtlı içten yanmalı motorlu araçlara (IYMA) kıyasla daha çevreci bir profil sunan elektrikli araçlar, aynı zamanda hızlı bir teknolojik gelişme sürecinden geçmektedir (Li, 2020, s. 103). Bu teknolojik ivmenin en temel nedenlerinden biri, AR-GE ve inovasyona dayalı büyümenin elektrikli araç pazarında gittikçe belirginleşmesidir. Otomobil üreticileri, batarya firmaları, yarı iletken üreticileri ve yazılım şirketleri gibi çok sayıda paydaş, elektrikli araç platformunda rekabet edebilmek adına yoğun bir araştırma-geliştirme faaliyetine

yatırım yapmaktadır (Lavieri ve Olivera, 2021, s. 19-27). Lityum-iyon batarya maliyetlerinin 2010'da kWh başına 800 USD seviyelerinden 2020'lerde 120-140 USD seviyelerine düştüğü gözlenmektedir (TÜBİTAK, 2020, s. 71). Gösterilen yoğun AR-GE faaliyetleriyle bu maliyetlerin 2025 sonrasında 80–90 USD/kWh bandına inmesi beklenmektedir (Ari, 2020, s. 193-194). Sonuç olarak, geleneksel otomotivde nispeten yavaş seyreden teknolojik yenilik döngüsü, elektrikli araçlarda oldukça hızlanmakta; motor, batarya, güç elektroniği, şarj altyapısı ve yapay zekâ entegrasyonu gibi alanlarda her yıl önemli ilerlemeler kaydedilmektedir (Batmaz, 2023, s. 28). Bu bağlamda, elektrikli araçların “fırsat yönleri” kabul edilenlerden biri olarak öne çıkan hızla gelişen teknoloji, endüstri 4.0 kavramının da etkisiyle otomotiv dünyasına farklı bir dinamizm getirmektedir (Machedon, 2020, s. 13). Artık yeni bir araç modeli geliştirme süreci, sadece motor ve şanzıman tasarımıyla sınırlı kalmayıp batarya mimarisi, sensör ve kamera sistemleri, araç içi bilgi-eğlence yazılımları, bulut tabanlı bağlantı ve hatta araçtan şebekeye (V2G) etkileşim gibi konuları da içermektedir (Boretti, 2020, s. 89). Bunların her biri, otomotiv endüstrisinin geleneksel yapısı içinde çok disiplinli AR-GE ekiplerinin devreye girdiği, çok yüksek katma değerli bir ekosistem yaratmaktadır (Tören ve Mollahasanoğlu, 2022, s. 1092). Dolayısıyla, elektrikli araçların hızlı gelişimi, otomotivin yanı sıra bilişim, enerji, telekomünikasyon, malzeme bilimi gibi farklı sektörleri de olumlu yönde etkilemekte; buralarda yeni iş fırsatları ve inovasyon alanları doğmaktadır (Tuncer, 2019, s. 60). Gerçekten de AR-GE ve inovasyon odaklı büyüme, elektrikli araç sektöründe küresel ölçekte öne çıkan bir rekabet unsuru haline gelmiştir. Örneğin, geçmişte sadece birkaç şirketin liderlik ettiği batarya teknolojilerinde bugün birçok firmanın lityum-iyon, katı hâl (solid-state), lityum-demir-fosfat, nikel-kobalt-alüminyum veya kobalt içermeyen çeşitli kimyalar üzerinde çalıştığı görülmektedir (Mozafar, vd., 2018, s. 220). Bu çeşitlilik, ortak bir hedefe, yani enerji yoğunluğunu artırma ve maliyeti düşürme hedefine odaklansa da yeniliklerin hızı ve çokluğu tüm sektörde kolektif bir ilerlemeyi teşvik etmektedir (Machedon). Altyapı tarafında da benzer bir durum söz konusudur: Hızlı şarj istasyonları, akıllı şebeke (smart grid) entegrasyonları, veri analitiği ve otonom sürüş sistemleri, elektrikli araç sektörüne özgü AR-GE yatırımlarının önemli kalemlerini oluşturmaktadır (Batmaz, 2023, s. 33). Bu çok yönlü inovasyon süreci, hem geleneksel otomobil üreticilerinin kendilerini yeniden yapılandırmasını hem de Tesla, Rivian, BYD gibi yeni nesil şirketlerin hızlı çıkış yapmasını mümkün kılan fırsatları ortaya çıkarmaktadır (Li, vd., 2016, s. 542). Özellikle Asya pazarında, Çin ve

Güney Kore merkezli firmaların batarya AR-GE faaliyetlerinde agresif büyüme göstermesi, Avrupa ve ABD’li otomobil devlerini de AR-GE bütçelerini artırmaya yöneltmiştir (Tury, 2019, s. 118).Avrupa Birliği ise elektrikli araç ekosisteminde bağımsızlık ve teknoloji liderliği arayışı doğrultusunda “European Battery Alliance” gibi inisiyatifler oluşturmuş, bu sayede AR-GE faaliyetlerini destekleyerek bölgesel üretim kapasitesini yükseltmeyi amaçlamaktadır (Abdülvahitoğlu, Abdülvahitoğlu, 2023, s. 233-234). Dolayısıyla, hızla gelişen teknoloji ve düşen batarya maliyetleri, sadece belirli bir coğrafyaya özgü değil, küresel bir rekabetin itici gücü olarak öne çıkmaktadır (Rezvani, vd., 2018, s. 1281). Sonuç olarak, elektrikli araçların fırsat yönlerinden biri olan “hızlı teknolojik gelişim”, bir yandan otomobil endüstrisini dönüşüme zorlarken, diğer yandan bilgi ve iletişim teknolojileri başta olmak üzere pek çok sektörde AR-GE kapasitesini artıran, istihdam yaratan ve sürdürülebilir büyümeyi teşvik eden bir çerçeve sunmaktadır (Lavieri ve Olivera, 2021, s. 45-50).

Grafik 1: Elektrikli Araçların Yıllara Göre Sunduğu Ortalama Menzilleri



Kaynak: <https://www.sustainabilitybynumbers.com/p/electric-car-range>

Düşen batarya maliyetleri ve ilerleyen malzeme teknolojileri, elektrikli araçların menzil ve şarj hızında gözle görülür iyileştirmeler getirmiştir (Li, vd., 2016, s. 542). Grafik 1’de görüldüğü üzere, yıllar geçtikçe araç bataryalarındaki inovasyona

bağlı olarak menzil değerleri artmaktadır. Batarya kimyaları geliştikçe, menzil ve şarj süresi gibi kullanıcı konforunu doğrudan ilgilendiren parametreler de iyileşecektir (Sevük, 2021, s. 30). Örneğin solid-state batarya teknolojisi, mevcut lityum-iyon teknolojisine kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha hızlı şarj kapasitesi vaat etmektedir (İbrahim & Gürsoy, 2021, s. 46). Örneğin, 2010’lu yılların başlarında ortalama 24-30 kWh kapasiteli bataryalara sahip modeller 150-200 km civarında menzil sunabiliyorken, günümüzde aynı segmentte 50 kWh veya üzeri kapasiteye ulaşan araçların menzili 350-400 km seviyesini rahatlıkla bulabilmektedir (Islam, vd., 2023, s. 5-8). Bu ilerleme, batarya kimyasında yaşanan gelişmelerin yanı sıra üretim ölçeklerinin büyümesi, batarya hücre tasarımının optimizasyonu ve araçlarda kullanılan güç elektroniği sistemlerinin daha verimli hale gelmesi sayesinde gerçekleşmektedir (Tuncer, 2019, s. 64). Ayrıca, nikel-kobalt-mangan (NCM) veya nikel-kobalt-alüminyum (NCA) bazlı hücrelerin daha yüksek enerji yoğunluğuna ulaşması, menzilin artmasında kritik bir role sahiptir (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 231). Menzil artışı sadece bireysel kullanıcılar için konforu yükseltmekle kalmamakta; aynı zamanda lojistik filolar, taksi şirketleri ve servis taşımacılığı gibi alanlarda da elektrikli araçların kullanımını cazip kılmaktadır (Zhao vd., 2019, s. 22). Öte yandan, “daha hızlı şarj” konusu da elektrikli araçların piyasadaki rekabet gücünü artıran bir unsurdur. İlerleyen batarya teknolojileri sayesinde 50 kW seviyesindeki “hızlı şarj” istasyonlarından 150 kW ve 350 kW gibi “ultra hızlı” kategorilere doğru bir geçiş yaşanmaktadır (Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 121). Bu yüksek güçte şarj sistemleri, bir aracın bataryasını %20’den %80’e yaklaşık 20-30 dakikalık sürede doldurabilmekte, böylece menzil kaygısı ve uzun şarj süreleri hakkındaki endişeleri bir ölçüde hafifletmektedir (Abdülvahitoğlu, Abdülvahitoğlu, 2023, s. 231-232). Bu gelişmelerin arkasında, batarya iç dirençlerinin azaltılması, ısı yönetimi sistemlerinin geliştirilmesi ve soğutma teknolojilerinin iyileştirilmesi gibi önemli AR-GE kalemleri yatmaktadır (Hoffman, 2017, s. 18). Nitekim yeni nesil “solid-state” pil konseptlerinde 10-15 dakikalık şarj süreleri hedeflenmekte, bu da orta vadede elektrikli araçların yakıt dolum konforuna daha çok yaklaşabileceği beklentisini doğurmaktadır (Machedon, 2020, s.18). Daha uzun menzilli ve daha hızlı şarj olan elektrikli araçlar, geleneksel benzinli ve dizel araçlarla karşılaştırıldığında en büyük handikaplardan biri olan “zaman ve mesafe” kısıtını hafifletmektedir (Tören ve Mollahasanoğlu, 2022, s. 1088). Yapılan saha araştırmalarında, 300-400 km seviyesini aşan menzil ve 30 dakikadan kısa hızlı şarj süresi, çoğu sürücünün uzun yol seyahatlerinde bile elektrikli araç

kullanımını makul bulmaya başladığını göstermektedir (Tsiropoulos vd., 2018). Bu durumun sadece bireysel tüketiciler için değil, kurumsal filolar ve toplu taşıma işletmeleri açısından da oldukça teşvik edici olduğu kaydedilmektedir (Çakmak ve Çiçek, 2024: 75). Örneğin, elektrikli otobüslerin gün içinde birkaç defa kısa aralıklarla şarj edilerek güzergâhta kesintisiz hizmet verebilmesi, belediyeler ve taşımacılık şirketleri için yakıt maliyetlerini azaltan ve emisyonları düşüren bir fırsat haline gelmiştir (MEB, 2021, s. 17). Ayrıca, menzil ve şarj hızındaki iyileşmeler sadece araçların kullanım pratikliğini değil, ikinci el pazarını da etkilemektedir. Uzun ömürlü ve yüksek kapasiteli bataryalar, ikinci el elektrikli araç piyasasında daha yüksek talep görmekte; dolayısıyla araçların değeri düşerken kayda değer bir dezavantaj yaşamamaktadır (Rezvani, vd., 2018, s. 1280). Bu durum, tüketicilerin elektrikli araca yatırım yapma kararlarında önemli bir pozitif etki yaratmaktadır. Daha güncel modellerle birlikte batarya maliyetlerinin de düşmesi, kullanıcıya hem satın alma sırasında hem de kullanım ömrü boyunca ekonomik avantaj sunmaktadır (Mozafar, vd., 2018, s. 224). Böylece, “menzil kaygısı” ve “uzun şarj süreleri” gibi başlıklarda süre gelen endişelerin yerini, “yeterli menzil ve hızlı şarj olanağı” ile daha olumlu bir algı almaya başlamaktadır (Tuncer, 2019, s. 66).

Elektrikli araçlar için hızla gelişen teknoloji ve düşen batarya maliyetleri, pazarın büyümesiyle birlikte rekabetin de artmasını sağlamaktadır. Sektörün ilk dönemlerinde, özellikle 2010’lu yılların başlarında, elektrikli araçlar “lüks” veya “niş” ürün kategorisinde yer almaktaydı (Lavieri & Olivera, 2021, s. 11-22). Ancak bugün Tesla, BYD, Hyundai, Volkswagen, Renault, Ford ve birçok otomobil üreticisi, farklı segmentlere hitap eden elektrikli modeller sunarak tüketiciler arasında geniş bir tercih yelpazesi yaratmaktadır (Zhou ve Li, 2018, s. 475). Aynı zamanda Çin, Avrupa ve Kuzey Amerika gibi bölgeler başta olmak üzere artan üretim hacmi ve devlet teşvikleri, birim maliyetlerin düşmesine katkı sağlamakta; böylece elektrikli araçların etiketi geleneksel araçlarla rekabete giderek yaklaşmaktadır (Tsiropoulos vd., 2018). Bu rekabetin temelinde yatan etkenlerden biri de bataryaların maliyetinde kaydedilen çarpıcı düşüştür. 2010’lu yıllarda kWh başına 1000 dolar seviyesinde olan batarya hücre maliyetlerinin 2020 sonrasında 130-150 dolar/kWh bandına kadar indiği belirtilmektedir (Zhao vd., 2019, s. 22). Fiyat düşüşünün en net yansıması, “toplam sahip olma maliyeti” (total cost of ownership – TCO) analizlerine bakıldığında görülmektedir (Kırmızıgül ve Baykal, 2023, s. 228-229). Yakıt, bakım, vergi ve benzeri giderleri de hesaba katan bu modelde elektrikli araçların, içten yanmalı

muadillerine kıyasla uzun vadede daha avantajlı hâle geldiği birçok çalışmada vurgulanmaktadır (Hoffman, 2017, s.19). Tabii ki satın alma esnasında hala belirgin bir fiyat farkı mevcut olsa da rekabetin artması ve ölçek ekonomilerinin devreye girmesi sayesinde bu fark giderek azalmaktadır (Batmaz, 2023, s. 27). Özellikle pil üretiminde büyük yatırımlar yapılarak üretim kapasitelerinin genişlemesi, tedarik zinciri optimizasyonu ve ileri malzeme teknolojileri gibi faktörler, kısa vadede dahi tüketiciye olumlu şekilde yansımaktadır (Tuncer, 2019, s. 68). Rekabetin artması aynı zamanda otomobil üreticileri arasında teknolojik inovasyon yarışını da körüklediğinden, her geçen gün daha fazla marka yüksek menzilli, hızlı şarj özellikli ve uygun fiyatlı modeller geliştirmenin peşinde koşmaktadır (Li, vd., 2016, s. 539). Öte yandan, fiyatlarda yaşanan düşüş eğilimi, devletlerin sağladığı teşvik mekanizmalarıyla da desteklendiğinde elektrikli araç ekosistemi için çok daha elverişli bir ortam oluşmaktadır (Abdülvahitoğlu, Abdülvahitoğlu, 2023, s. 222; Gürbüz ve Kulaksız, 2016, s. 120). Örneğin, Avrupa ülkelerinde ve Çin’de uygulanan vergi indirimleri, satın alma desteği, ÖTV veya KDV muafiyetleri gibi politikalar, hızla gelişen teknolojiyi tüketiciye daha makul fiyatlarla sunabilme avantajı doğurmaktadır (MEB, 2021, s. 18). Bu da rekabeti güçlendirerek firmaları fiyat kırmaya ve maliyetleri daha da azaltmaya yöneltir (Li, vd., 2016, s. 539). Sonuç olarak, pazardaki oyuncu sayısının çoğalması, ölçek ekonomilerinin etkisi ve teknolojik inovasyon hızının artması, elektrikli araçların fiyatlarının her geçen yıl daha rekabetçi bir düzeye gelmesine katkıda bulunmaktadır (Zhao vd., 2019, s. 22). Rekabetin artmasıyla fiyatların düşmesi, sadece bireysel tüketicileri değil, aynı zamanda filoları, şirketleri ve toplu taşıma projelerini de elektrikli araçlara yöneltmektedir (Tören ve Mollahasanoğlu, 2022, s. 1089). Örneğin, kurumsal filo yöneticileri, araçların yüksek yakıt tasarrufu ve düşük bakım masrafları sebebiyle uzun vadede önemli ölçüde kârlılık sağladıklarını fark ederek elektrikli modellere yatırım yapmaktadır (Machedon, 2020, s. 20). Aynı şekilde, şehir içi otobüsler, taksi ve dağıtım servis araçları, işletme maliyetlerindeki düşüş ve emisyon hedeflerini yakalama amacıyla elektrifikasyona yönelmektedir (Batmaz, 2023, s. 29). Sonuç olarak, hızla gelişen teknoloji ve düşen batarya maliyetlerinin yarattığı rekabetçi ortam, elektrikli araçların fiyatlarını geleneksel araçlara yakınlaştırmakta ve toplumun daha geniş kesimlerinde benimsenmesini kolaylaştırmaktadır (Lavieri ve Olivera, 2021, s. 52-60).

3.3.2. Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu

Elektrikli araçlar (EA), ulaşım sektöründe karbondioksit emisyonlarını azaltmanın ve fosil yakıt tüketimini düşürmenin önde gelen yollarından biri olarak görülmektedir. Fakat bu araçların sağladığı potansiyel fayda, enerji kaynaklarının nasıl elde edildiğiyle de yakından ilişkilidir (IEA, 2022, s. 18). Eğer şarj edilen elektrik ağırlıklı olarak kömür veya petrol gibi geleneksel kaynaklardan geliyorsa, elektrikli araçların “çevre dostu” niteliği zayıflayabilmektedir. Bu noktada devreye giren yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle güneş ve rüzgâr, elektrikli ulaşımı çok daha yeşil ve sürdürülebilir kılma potansiyeline sahiptir. Üstelik son on yılda güneş panelleri ve rüzgâr türbinlerinin kurulum maliyetlerinde yaşanan hızlı düşüş, elektrik üretiminde rekabetçi bir tablo oluşturmuş; güneş ve rüzgâr çiftlikleriyle sağlanan elektriğin kWh başına maliyeti, pek çok coğrafyada fosil yakıtlarla rekabet edebilir seviyelere inmiştir (IRENA, 2021, s. 15). Bir zamanlar teknolojiye erişim maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle proje ölçekleri sınırlı kalan fotovoltaik (PV) sistemleri, panel verimliliklerinin artması ve üretim hacminin çoğalmasıyla birlikte hızla yaygınlaşmıştır. Güneş enerjisi, özellikle bol güneş alan bölgelerde (örneğin Akdeniz havzası, Orta Doğu, Kaliforniya veya Avustralya gibi) kWh başına 2-3 dolar cent düzeyine kadar düşen elektrik üretim maliyetleriyle öne çıkmaktadır (Xu & Yang, 2021, s. 2). Rüzgâr enerjisinde ise karasal (onshore) türbin kurulumları 30-40 yıl önceye kıyasla çok daha güçlü ve ekonomik hale gelmiş; özellikle geniş ovalarda ya da yüksek rüzgâr koridorlarına sahip kıyı bölgelerinde rüzgâr santralleri, baz yük santrallerine yakın bir kapasite faktörü yakalayabilmiştir (Sovacool, Axsen, & Kempton, 2017, s. 276). Bu iki kaynağın maliyetindeki gerileme, elektrikli araçların şebekeden çektiği enerjinin birim maliyetini düşürerek işletme giderlerini ciddi oranda azaltmaktadır (IEA, 2022, s. 25). Ekonomik avantajın yanı sıra, güneş ve rüzgâr enerjisinin entegrasyonu, elektrikli araçların karbon ayak izini küçültmekte ve yerel hava kirliliğine karşı mücadelede önemli bir rol oynamaktadır. Geleneksel içten yanmalı motorlu araçlar (IYMA), egzoz emisyonlarıyla şehir içi hava kalitesini olumsuz etkilerken, elektrikli araçların egzoz salımı bulunmamakta; tek koşul, o elektriğin düşük veya sıfır emisyonlu kaynaklardan elde edilmesidir (Qian, Zhou, Yuan, & Wu, 2013, s. 768). Güneş enerjisi ise tam da gündüz saatlerinde pik üretim sağladığından, eğer iş yerlerinde veya ticari parklarda kurulu şarj üniteleri mevcutsa, araçlar çalışma saatlerinde şarj edilerek fosil kaynaklara bağımlılığı azaltabilir (IRENA, 2021, s. 29). Rüzgâr enerjisinin üretimi ise çoğunlukla gece saatlerine

kayabildiğinden, akşam saatlerinde araçların şarj edilmesi benzer bir avantaj sunar (Xu & Yang, 2021, s. 2). Farklı bölgelerde güneş ve rüzgârın mevsimsel veya günlük üretim profilleri birbirini tamamladığında, elektrikli araçlara neredeyse 7/24 yenilenebilir kaynaklardan elektrik sağlamak teorik olarak mümkündür (Keles, 2019, s. 65). Diğer taraftan, yenilenebilir enerji entegrasyonunun elektrik fiyatlarını uzun vadede daha istikrarlı bir düzeye çekebileceği öngörülmektedir. Fosil yakıt fiyatlarının uluslararası piyasalarda sık dalgalanması, araç sahiplerinin de yakıt (veya elektrik) maliyetlerini öngörmesini zorlaştırmaktadır (IEA, 2022, s. 27). Ancak güneş ve rüzgâr projelerinin sabit yatırım maliyetleriyle (capex) finanse edilmesi ve işletme giderlerinin düşük olması, uzun vadeli sabit tarifeler veya alım anlaşmaları (Power Purchase Agreement—PPA) yoluyla istikrarlı fiyat yapısı sunabilmektedir (Sovacool et al., 2017, s. 278). Bu da hem bireysel elektrikli araç kullanıcıları hem de kurumsal filo yöneticileri için güvenli bir maliyet planlamasına imkân tanır. Böylece, yenilenebilir enerji projeleriyle birlikte kurulmuş şarj altyapısı (örneğin, rüzgârdan beslenen hızlı şarj istasyonları veya güneş panelli otoparklar) sayesinde işletme maliyetleri öngörülebilirlik kazanır (Xu & Yang, 2021, s. 3). Bu durum, elektrikli araçların toplam sahip olma maliyetini (total cost of ownership, TCO) düşüren bir faktördür ve kullanıcıları daha hızlı elektrikli araç benimsemeye teşvik eder.

Elektrikli araçlar ile yenilenebilir enerjinin bütünleşmesinde önemli bir diğer fırsat, akıllı şebeke (smart grid) teknolojilerinin devreye girmesiyle gerçekleşir. Akıllı şebekeler; sayısal iletişim, veri analitiği ve otomasyon unsurlarını kullanarak elektrik üretim, dağıtım ve tüketim süreçlerini en verimli şekilde koordine etmeyi amaçlar (IEA, 2022, s. 29). Bu kapsamda, elektrikli araçlar yalnızca “tüketici” rolünde olmaktan çıkarak, aynı zamanda “esnek yük” ve hatta “mikro-depo” vazifesi görebilir. Burada öne çıkan konsept, araçtan-şebekeye (Vehicle-to-Grid, V2G) teknolojisidir: Elektrikli araç bataryalarında depolanan enerjinin, talebin yoğun olduğu saatlerde kısmen veya tamamen şebekeye geri verilebilmesi anlamına gelir (Sovacool et al., 2017, s. 281). V2G uygulamaları, özellikle yenilenebilir kaynakların doğasından kaynaklanan dalgalanmaların dengelenmesi konusunda kritik bir çözüm sunar. Güneş ve rüzgâr enerjisinin üretim profili sürekli değişkenlik gösterirken, elektrikli araçların bataryaları bu değişimi yumuşatacak bir tampon mekanizması oluşturur (Qian et al., 2013, s. 769). Örneğin, öğle saatlerinde güneş enerjisinin zirvede olduğu bir bölgede, akıllı şebeke yönetim sistemi araçlara “şimdi şarj ol” komutu gönderebilir; gece geç saatlerde rüzgâr üretiminin arttığı bir başka bölgede ise araç bataryaları yoğun şekilde

doldurulabilir. Tersine, pik talep yaşanan akşam saatlerinde veya beklenmedik bir arz düşüşünde, araç bataryaları belirli bir ücret karşılığında şebekeye enerji geri besleyerek hem sürücülerin hem de şebeke operatörlerinin kazanç elde etmesini sağlayabilir (Keles, 2019, s. 68). Akıllı şebekelerin ve V2G uygulamalarının hayata geçmesi için standartlar ve teknoloji adaptasyonu önemlidir. Farklı marka ve modellerdeki elektrikli araçların, çeşitli şarj protokollerini (CHAdEMO, CCS, vb.) desteklerken aynı zamanda V2G uyumlu olması, yazılım katmanında da veri iletişiminin güvenli ve hızlı yürütülmesi gerekmektedir (Xu & Yang, 2021, s. 4). Şarj istasyonlarının yoğun olduğu bölgelerde şebeke yük yönetimi, arz-talep dengelemelerini gerçek zamanlı takip edebilen akıllı sayaç ve yönetim birimleri aracılığıyla yapılır. Bu sayede elektrik maliyetinin düşük olduğu saatler veya yenilenebilir üretimin yüksek olduğu anlarda araçlar şarj olarak enerji maliyetini düşürür; tam tersi durumda, şebekeye aktarım yaparak ek gelir elde etme fırsatı yaratır (IRENA, 2021, s. 32). Bu döngüdeki temel unsur, araç sahiplerine sunulacak ekonomik teşviklerdir. Eğer sürücüler, “belirli saatlerde bataryayı şebekeye açarak” %5-%10 oranında bir gelir artışı veya elektrik faturasında indirim elde edebiliyorsa, V2G uygulamalarına gönüllü katılım artacaktır (IEA, 2022, s. 33). Ayrıca elektrikli araçların kendi bataryalarının ömrünü korumak adına, akıllı şebeke yönetimi batarya sağlığını göz önünde bulunduran algoritmalar kullanılmalıdır (Qian et al., 2013, s. 770). Bataryanın çok fazla deşarj edildiği veya hızlı şarj akımlarına maruz kaldığı durumlarda kapasitede erken düşüş söz konusu olabilir; bu nedenle şebeke operatörleri ve araç üreticileri arasındaki iş birliği, V2G senaryolarının uzun vadeli başarısı için kritik önem taşır (Sovacool et al., 2017, s. 283). Özetle, akıllı şebeke ve V2G entegrasyonu, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektriğin verimli kullanımını sağlayarak hem dağıtık depolama kabiliyeti sunar hem de elektrikli araç kullanıcılarına ekonomik kazanç fırsatı yaratır (Keles, 2019, s. 70). Bu, yenilenebilir enerjinin sistemdeki payını artırırken şebeke güvenilirliğini de korur. Böylece, elektrikli araçların yenilenebilir enerji entegrasyonundaki rolü, salt enerji tüketimi boyutunun ötesine geçerek aktif bir “esneklik” mekanizmasına dönüşür (IRENA, 2021, s. 35).

Elektrikli araçların yenilenebilir kaynaklarla güçlendirilmesi, güncel ulusal ve uluslararası yeşil dönüşüm stratejileri açısından da büyük bir fırsat sunmaktadır. Birçok ülke, 2030 veya 2050 yıllarına kadar net sıfır emisyon (net zero) hedefleri benimsemiş ve bu doğrultuda ulaşım sektörü dahil olmak üzere enerji altyapısını yeniden şekillendirmeye koyulmuştur (IEA, 2022, s. 36). Ulaşımın elektrikleştirildiği

bir senaryoda, kömür ve doğalgazla çalışan santrallerin yerini giderek daha fazla güneş, rüzgâr, hidroelektrik veya jeotermal enerji santralleri aldığıında, tam anlamıyla karbonsuzlaşmış bir ulaşım sistemi mümkündür (Xu & Yang, 2021, s. 6). Bu doğrultuda politika yapıcılar, elektrikli araç ve yenilenebilir enerji sektörlerini teşvik eden vergi düzenlemeleri, hibe programları ve altyapı yatırımlarıyla endüstriyel dönüşümü hızlandırmaktadır (Sovacool et al., 2017, s. 285). Yeşil dönüşüm hedefleri, sadece çevresel bir gereklilik değil aynı zamanda ekonomik ve toplumsal fayda da sağlayabilir. Yenilenebilir kaynakların yaygınlaşması, elektrik arzındaki dışa bağımlılığı azalttığından enerji güvenliğini artırır; elektrikli araçlar ise fosil yakıt ithalatını azaltarak cari açığı düşürmeye yardımcı olabilir (IRENA, 2021, s. 37). Bunun yanı sıra, güneş ve rüzgâr sektörü ile elektrikli araçlar arasındaki sinerji, yeni iş alanları oluşturur. Örneğin, güneş enerjisi sektöründe panel üretimi, montajı ve işletmesi, rüzgâr türbinleri için lojistik ve bakım hizmetleri, batarya geri dönüşüm teknolojileri ya da V2G yazılım çözümleri, hepsi bir bütün olarak ekonomik büyümeye katkıda bulunur (Keles, 2019, s. 72). Aynı şekilde, yerel yönetimler de kent içi hava kalitesini iyileştirmek, gürültü kirliliğini azaltmak ve modern bir toplu taşıma ağı sunmak adına elektrikli otobüs ve taksi projelerine yönelmektedir (Qian et al., 2013, s. 772). Bu projelerin enerji kaynağı olarak yenilenebilir kaynaklar tercih edildiğinde, çevresel etkiler en aza inerken toplumsal yarar en üst düzeye çıkar. Yeşil dönüşüm hedeflerine uyum sağlayan bir enerji-ulaşım entegrasyonu, orta ve uzun vadede küresel karbon emisyonlarını anlamlı ölçüde azaltabilir. Araştırmalar, elektrikli araç kullanım oranının %50'yi aştığı senaryolarda, yenilenebilir kaynakların sistemdeki payı da yeterince yüksekse, ulaşım kaynaklı karbondioksit emisyonlarında %40'a varan düşüşler kaydedilebileceğini öngörmektedir (IEA, 2022, s. 40; Sovacool et al., 2017, s. 286). Bu durum, iklim değişikliğiyle mücadelede “kritik eşik” olarak görülen 2°C hedefini yakalamak adına oldukça değerli bir katkıdır (Qian et al., 2013, s. 773). Dahası, tüketicilerin ve kurumların “yeşil imaj” arayışı, sürdürülebilir yatırımları cazip kılarak yeni bir ekonomik döngü başlatabilir. Şirketlerin kurumsal sosyal sorumluluk projeleri veya karbon ayak izi azaltma planlarında elektrikli araçlara yönelmesi, yenilenebilir kaynaklara talebi de artırarak enerji piyasasında dönüşümü hızlandırır (Xu & Yang, 2021, s. 7). Sonuç itibarıyla, elektrikli araçların yenilenebilir enerji entegrasyonuna açık yapısı, güneş ve rüzgâr gibi temiz kaynakların hızla yaygınlaşmasıyla çarpıcı biçimde değer kazanmaktadır. Akıllı şebeke ve V2G uygulamaları sayesinde hem arz-talep dengesizlikleri giderilmekte hem de kullanıcılar

ekonomik avantajlar elde edebilmektedir (IRENA, 2021, s. 39). Bu yapı, günümüzde giderek daha fazla ülkenin stratejik planlarında yer almakta ve yeşil dönüşüm hedefleri çerçevesinde ulusal ve uluslararası politikaları şekillendirmektedir (Keles, 2019, s. 74). Dolayısıyla, elektrikli araçların yenilenebilir enerji entegrasyonu ile sağladığı fırsatlar, sürdürülebilir ulaşımın ekonomik, çevresel ve toplumsal boyutlarını güçlendiren kritik bir paradigma değişikliği olarak öne çıkmaktadır.

3.3.3. Politik Teşvikler ve Düzenleyici Destek

Elektrikli araçların (EA) hızlı yükselişinde, teknolojik gelişmeler ve maliyet düşüşleri kadar politik teşviklerin de büyük payı olduğu söylenebilir. Çevre dostu araçlara geçişi hızlandırmak isteyen hükümetler, çeşitli vergi indirimleri, sübvansiyonlar ve hibe programları aracılığıyla sektörün önünü açmaktadır (IEA, 2022, s. 14). Bu tür teşvikler, elektrikli araçların geleneksel içten yanmalı motorlu araçlarla (IYMA) rekabet edebilmesini kolaylaştırmakta; henüz ölçek ekonomilerini tam anlamıyla yakalayamayan EA üreticileri için kritik bir destek mekanizması sunmaktadır (BloombergNEF, 2021, s. 7). Örneğin, Avrupa’da birçok ülke katma değer vergisi (KDV) muafiyeti, ÖTV indirimi ya da nakit hibe yöntemiyle elektrikli araç satın alan bireysel ve kurumsal kullanıcıları ödüllendirmekte; bu politikaların etkisiyle 2020’li yılların başından itibaren Avrupa pazarında elektrikli otomobil payının hızla arttığı gözlemlenmektedir (ACEA, 2022, s. 3). Vergi indirimleri ve doğrudan hibe programları, özellikle araç satın alırken yapılan ilk yatırım maliyetini aşağı çekmesi nedeniyle, tüketicilerin elektrikli araçlara yönelmesinde etkin bir rol oynar. Örneğin, Norveç hükümetinin uyguladığı %25 KDV muafiyeti, EA’ların IYMA’lara göre fiyat avantajı yakalamasını sağlamış ve kısa sürede yüksek oranda elektrikli otomobil penetrasyonu elde edilmiştir (Norwegian EV Association, 2021). Benzer şekilde, Çin’de merkezi hükümet tarafından tahsis edilen satın alma hibeleri ve yerel yönetimlerin ek avantajları (ücretsiz plaka, şehir içi trafiğinde kullanım ayrıcalıkları gibi) sayesinde elektrikli araç satışlarında dünya liderliğini yakalamıştır (Li & Li, 2022, s. 45). Türkiye’de ise elektrikli araçların Özel Tüketim Vergisi oranlarının belirli motor gücü eşliğinde düşük tutulması ve ek gümrük muafiyetleri, yerli tüketicilerin ilgisini artırmaya yönelik çabalardan biridir (Hoffman, 2017, s.16). Bununla birlikte, vergi indirimleri ve hibe programları uzun vadede sürdürülebilir olamayabilir veya düzenli olarak revize edilmesi gerekebilir. Bazı uzmanlar, kamu maliyesine yük getiren bu teşviklerin çok uzun soluklu devam edemeyeceğini, bu

nedenle elektrikli araç endüstrisinin kendi ayakları üzerinde duracak seviyeye en kısa sürede ulaşmasının hedeflendiğini belirtmektedir (IEA, 2022, s. 21). Örneğin, hibelerin aniden kaldırılması veya vergi avantajlarının süratle azaltılması durumunda pazarın şok etkisiyle yavaşlaması mümkün olabilir (BloombergNEF, 2021, s. 8). Dolayısıyla, kamu politikalarının tasarımı “kademeli azaltım” (phase-out) stratejileri önem kazanmakta, tüketicilerin ve üreticilerin bu geçişe uyum sağlamasını kolaylaştıracak planlar gündeme gelmektedir (ACEA, 2022, s. 5). Bir diğer husus ise hibe veya vergi indirimlerinin yalnızca satın alma aşamasında değil, işletme ve bakım giderlerinde de avantaj sağlamasıdır. Örneğin, elektrikli araç kullanıcılarına düşük bandrolden yararlanma veya park ücreti muafiyeti gibi ek ayrıcalıklar, uzun vadeli bir teşvik etkisi yaratabilmektedir (Hoffman, 2017, s.17). Vergi indirimleri ve hibe politikalarının ekonomik boyutunun yanı sıra çevre dostu politikalarla da uyumlu olması beklenir. Zira teşviklerin ana gayesi, sera gazı emisyonlarını ve fosil yakıt bağımlılığını azaltmaktır. Bu yüzden, ekolojik dengeyi korumak adına oluşan mali yükün toplumsal yarar çerçevesinde değerlendirildiği bir politika dizaynı önem taşır (Li & Li, 2022, s. 46). Örneğin, hibrit araçlar da dahil olmak üzere farklı teknoloji türlerine verilen teşviklerin, karbon emisyonu ve enerji verimliliği kriterleriyle uyumlu olması gerekir. Böylece, yalnızca araç sayısını artırmaya yönelik bir destek mekanizmasının ötesinde, gerçekten sürdürülebilir ulaşım modellerine katkı sağlayacak bütüncül politikalar uygulanabilir (ACEA, 2022, s. 6).

Elektrikli araçlara yönelik politik teşviklerin bir diğer boyutu, emisyon standartlarının giderek sıkılaşmasıdır. Birçok ülke ve bölge, iklim değişikliğiyle mücadele ve hava kalitesini iyileştirme amacı doğrultusunda taşıtlara yönelik emisyon limitlerini düşürmekte, karbon dioksit (CO₂), azot oksitler (NO_x) ve partikül madde (PM) salınımlarını katı şekilde sınırlamaktadır (EU Commission, 2021). Avrupa Birliği’nin CO₂ emisyon standartları örnek verilebilir: 2030 sonrasına dair belirlenen hedeflerde otomotiv üreticilerinin filodaki ortalama CO₂ salınımlarını önemli ölçüde azaltması zorunlu kılınmıştır. Bu hedeflere ulaşamayan üreticilere yüksek para cezaları uygulanmakta, dolayısıyla içten yanmalı motorlu araçların üretim ve satışını kârsız hale getirmektedir (Transport & Environment, 2022, s. 11). Elektrikli araçlar, sıfır emisyonlu kategoride yer aldığından, üreticilere bu katı standartları karşılama konusunda büyük avantaj sağlamaktadır. Emisyon standartlarının sıkılaşması, piyasa dinamiklerine de yön vermektedir. Otomobil markaları, yüksek cezalardan kaçınmak ve “temiz” imajını korumak adına elektrikli modellere hızla yatırım yapmakta; aynı

zamanda AR-GE bütçelerini batarya, elektrik motoru ve ilgili teknolojilerin geliştirilmesi için kullanmaktadır (IEA, 2022, s. 28). Örneğin, Avrupa’da faaliyet gösteren büyük üreticiler, CO₂ emisyonlarını her geçen yıl daha fazla sınırlayan düzenlemelere uyum sağlamak amacıyla, yeni platformlarını neredeyse tamamen elektrikli veya hibrit araçlar üzerine kurmayı tercih etmektedir (EU Commission, 2021). ABD’de Kaliforniya Eyaleti başta olmak üzere, “Zero Emission Vehicle (ZEV)” programı gibi düzenlemeler uygulanmakta ve belirli bir oranın üzerinde sıfır emisyonlu araç satışı yapamayan üreticilere yaptırımlar getirilmektedir (U.S. DOE, 2021, s. 9). Bu tür politikalar, üreticiler için başlangıçta maliyetli ve zorlu bir uyum süreci yaratsa da bir yandan elektrikli araç pazarının gelişimini hızlandırarak uzun vadede ölçek ekonomilerine katkı sunar (BloombergNEF, 2021, s. 11). Emisyon standartları sadece küresel iklim politikalarıyla ilgili değildir; aynı zamanda şehir içi hava kalitesini yükseltmek isteyen yerel yönetimler de düşük emisyon bölgeleri (Low Emission Zones, LEZ) veya sıfır emisyon bölgeleri gibi uygulamalarla elektrikli ulaşımı teşvik etmektedir (Transport & Environment, 2022, s. 13). İstanbul, Londra, Paris ve Berlin gibi büyük metropollerde, şehir merkezine girişte ek vergiler veya yasaklar söz konusu olabilir; elektrikli araç sahipleri bu kısıtlamaların dışında tutularak avantajlı konuma geçer (EU Commission, 2021). Bunun sonucunda, şirket filoları ve bireysel tüketiciler, sıkılaşan standartlar nedeniyle içten yanmalı araçlara getirilen kısıtlamalar veya ek maliyetlerden kaçınmak amacıyla elektrikli modellere yönelir. Böylece, emisyon standartları sadece “cezalandırıcı” bir mekanizma olmanın ötesine geçerek, EA’ların fırsat yönünü pekiştiren olumlu bir itici güç şeklinde işlev görmektedir (U.S. DOE, 2021, s. 11). Sıkılaşan standartlar, uzun vadede teknolojik inovasyonu teşvik eder. Üreticiler, tüketicilere hem menzil hem de maliyet açısından daha rekabetçi elektrikli modeller sunabilmek adına batarya AR-GE’sine ve yeni üretim yöntemlerine yatırım yapmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip piller, hızlı şarj özellikleri ve düşen maliyetler, emisyon standartlarıyla birleştiğinde elektrikli araçların pazar payını artırır (IEA, 2022, s. 32). Böylece, elektrikli araçlar açısından önemli bir fırsat penceresi doğar: Yasal zorunluluklar ve çevre bilinci aynı anda devreye girerek geleneksel yakıtlı araçlardan hızlı bir geçişi tetiklemektedir (Transport & Environment, 2022, s. 15).

Politik teşvikler ve düzenleyici destekler arasında belki de en kritik aşamalardan biri, şarj altyapısının yaygınlaştırılması ve standartlaştırılmasıdır. Elektrikli araçların kullanımını sınırlayan faktörlerin başında gelen “menzil kaygısı”,

büyük ölçüde istasyonların eksikliği ve farklı şarj protokollerinin yarattığı karmaşa ile bağlantılıdır (IEA, 2022, s. 35). Bu nedenle, birçok hükümet ve yerel yönetim, şarj istasyonu kurulumlarını teşvik eden hibe programları, vergi indirimleri veya kamu-özel sektör ortaklıklarını devreye sokarak altyapının hızla gelişmesini amaçlar (ACEA, 2022, s. 9). Örneğin, Avrupa Komisyonu, 2030 yılına kadar otoyol, şehir merkezi ve kırsal kesimler dahil olmak üzere geniş bir bölgede hızlı şarj ve normal şarj noktaları kurulmasını zorunlu kılan mevzuat teklifleri sunmuştur. Üye ülkeler, bu hedefleri yakalamak üzere elektrik şebekesi yatırımlarını ve istasyon montaj desteklerini bütçelerinden karşılayabilmektedir (EU Commission, 2021). Standartlaştırma, şarj altyapısı teşviklerinin başarısında belirleyici bir faktördür. Farklı markaların farklı konnektör tipleri veya protokoller (CHAdEMO, CCS, Tesla Supercharger vb.) kullanması, kullanıcılar için karmaşa yaratabilir. Avrupa’da CCS (Combined Charging System) yaygınlaşırken Japonya merkezli CHAdEMO standardı da hâlâ kullanılmaktadır (U.S. DOE, 2021, s. 12). Politik düzenlemeler, ortak protokol veya en azından çoklu standardı destekleyen istasyonlar üzerinden ilerlediğinde, sürücülerin “şarj erişilebilirliği” artar ve pazarın büyümesi hızlanır (Transport & Environment, 2022, s. 17). Benzer şekilde, ödeme sistemlerinin standartlaşması (RFID kartlar, mobil uygulamalar, temassız kredi kartı vb.) da kullanıcı deneyimini iyileştirerek elektrikli araçları yaygınlaştırma hedeflerine katkı sunar (ACEA, 2022, s. 11). Şarj altyapısı teşvikleri ve standartlaştırma, yalnızca binek otomobiller için değil, aynı zamanda ticari filolar ve toplu taşıma araçlarında da önemlidir. Belediye otobüsleri veya hafif ticari araçlar için özel şarj depoları, depo-gece şarj senaryoları, hızlı şarj terminalleri gibi çözümler, doğrudan kamu ihaleleriyle finanse edilebilir (EU Commission, 2021). Bu noktada elektrikli araçların şehir içi hava kalitesi ve gürültü kirliliğini azaltma potansiyeli, yerel yönetimlerin söz konusu projelere bütçe ayırmasında etkili olmaktadır (IEA, 2022, s. 38). Ayrıca altyapıya dair düzenlemeler, bina yönetmelikleri (örneğin, yeni yapılan apartmanlarda zorunlu şarj üniteleri) veya otopark düzenlemeleri (belirli sayıda şarj noktasının tesis edilmesi) yoluyla desteklenebilir. Böylece, sadece ana arterlerde değil, konut ve işyerleri gibi günlük hayatta sık kullanılan mekânlarda da şarj ağı oluşturmak mümkündür (BloombergNEF, 2021, s. 13). Neticede, şarj altyapısı ve standartlaşma alanındaki politik teşvikler, elektrikli araçların en büyük algısal ve pratik dezavantajlarından biri olan “şarj erişimi” sorununu hafifletmektedir. Kamusal alanda yaygın istasyonlar, güvenilir ödeme sistemleri ve farklı protokollerle uyumlu konnektörler, tüketicilerin

benimseme hızını artırırken, üreticilerin de farklı piyasalara rahatlıkla giriş yapabilmesini sağlamaktadır (ACEA, 2022, s. 12). Dolayısıyla, politik teşviklerin bu ayağı, sektördeki büyümeyi destekleyen ve elektrikli araçların fırsat yönlerinden biri olarak öne çıkan kritik bir unsurdur (Transport & Environment, 2022, s. 19). Hem kısa vadede satışları teşvik eden vergi indirim ve hibe programlarına, hem de uzun vadeli emisyon standartlarına ek olarak şarj altyapısında görülen politik destek ve standardizasyon çabaları, elektrikli araç ekosisteminin dengeli ve sürdürülebilir bir şekilde gelişmesini mümkün kılmaktadır (IEA, 2022, s. 40). Politik ve düzenleyici teşvikler, elektrikli araç sektörüne ivme kazandıran en önemli fırsat alanlarından. Bu teşviklerin devamlılığı, pazarın istikrarlı büyümesi açısından kritik öneme sahiptir (TÜBİTAK, 2020, s. 74).

3.3.4. Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine Doğrudan Katkı

Elektrikli araçlar (EA), son yıllarda yalnızca çevresel kaygılardan ötürü değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyokültürel alanda yarattığı potansiyel katma değer sebebiyle de gündemdedir. Özellikle sürdürülebilir kalkınma hedefleri (Sustainable Development Goals, SDG) çerçevesinde değerlendirildiğinde, EA ekosisteminin ekonomik büyüme ve istihdam üzerinde doğrudan etkisi olduğu görülmektedir (Lu, Xie, Chen, & Zhou, 2020, s. 3). Otomotiv sektörü, tedarik zinciri, altyapı ve enerji gibi çok sayıda sektörü kesen yapısıyla elektrikli araçlar, yeni iş kollarının oluşmasına ve mevcut sektörlerin dönüşmesine yol açar. Örneğin, geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara (IYMA) kıyasla daha az mekanik parça barındıran EA'lar, pil üretimi, güç elektroniği, yazılım geliştirme, ileri malzeme teknolojileri gibi alanları ön plana çıkarır (Heidrich et al., 2017, s. 1504). Böylece, sektör içinde ve çevresinde yüksek katma değerli meslek dalları oluşmakta; üretim süreçlerinin yeniden yapılandırılmasıyla birlikte özellikle AR-GE, montaj ve satış sonrası hizmetlerde uzmanlaşmaya yönelik iş gücü talebi artmaktadır (Mishra & Saxena, 2021, s. 35187). Elektrikli araçların ekonomik büyümeye etkisini değerlendirmek üzere yapılan çalışmalarda, batarya teknolojilerinin yerli üretimi ve yan sanayinin gelişmesi, bir ülke ekonomisine yüksek ihracat geliri ve istihdam artışı getirebileceği vurgulanmaktadır (Toksöz, 2020, s. 66). Zira lityum-iyon pil hücreleri, güç dönüştürücüler, şarj altyapısı ekipmanları gibi kritik bileşenlerin yerel olarak üretilmesi, ithalat bağımlılığını azaltıp ulusal sanayiye canlandırır. Buna ek olarak, elektrikli araçların bakım ve onarım süreçleri, farklı uzmanlık alanları gerektirdiğinden, özellikle meslekî eğitim kurumlarına,

üniversitelere ve özel kurslara yönelik talep artar; bu durum da beşerî sermayenin gelişimine katkıda bulunur (Tury, 2019, s. 118). Örneğin, Türkiye’de son yıllarda yerli batarya üretimi ve elektrikli araç yatırım projeleri, on binlerce kişilik istihdam potansiyeliyle gündeme gelmiştir (Toksöz, 2020, s. 68). Elektrikli araçların üretim ve kullanımının yaygınlaşması, ayrıca yeni yatırım fırsatları da yaratır. Kurumsal filolarını karbon ayak izini düşürmek amacıyla elektrikli modellere çeviren şirketler, bu geçişi destekleyen finansal mekanizmalar (örneğin yeşil tahviller, sürdürülebilir yatırım fonları) yoluyla daha geniş piyasalara erişebilir. Özellikle Avrupa Birliği ülkelerinde, otomotiv firmalarının elektrikli model üretimi arttıkça batarya ve yazılım teknolojileri sahasında yatırımlar da çoğalmaktadır (Heidrich et al., 2017, s. 1508). Bu kapsamda, dış ticarete hem yüksek teknoloji ürün ihracatı artabilir hem de ülkelerin makroekonomik konumunu güçlendirecek stratejik iş birlikleri oluşabilir (Mishra & Saxena, 2021, s. 35189). Örneğin, Asya’da elektrikli araç ve batarya üretimi konusunda lider konuma gelmek isteyen ülkelerin küresel şirketlerle kurduğu AR-GE ortaklıkları, yerli şirketlerin küresel değer zincirine entegre olmasını kolaylaştırmaktadır (Lu et al., 2020, s. 5). Bu çerçevede, sürdürülebilir kalkınma hedefleri bağlamında değerlendirildiğinde, ekonomik büyüme ve istihdam yaratma potansiyeli, yalnızca gelir artışı değil aynı zamanda teknolojik gelişme ve rekabet gücü açısından da önemlidir. Elektrikli araçlar, küresel iklim değişikliği ve enerji güvenliği sorunlarıyla mücadelede bir “zorunluluk” olarak görülmeye başladıkça, sektörün giderek büyüyeceği; dolayısıyla yeni nesil fabrikalar, yan sanayi kolları, altyapı tedariki ve hizmet sektörü (örneğin şarj istasyonu operatörleri) gibi alanlarda iş hacminin sürekli artacağı öngörülmektedir (Dong et al., 2014, s. 52). Bu büyüme, yeşil ekonomiye geçişin bir parçası olarak değerlendirildiğinde, uzun vadede toplumun ekonomik refah seviyesini ve teknoloji kapasitesini güçlendiren bir unsura dönüşebilir. Sonuç olarak, elektrikli araç ekosistemi, sürdürülebilir kalkınmanın en temel hedeflerinden olan “insana yakışır iş ve ekonomik büyüme” (SDG 8) ekseninde önemli bir kaldıraç işlevi görmektedir (Heidrich et al., 2017, s. 1510).

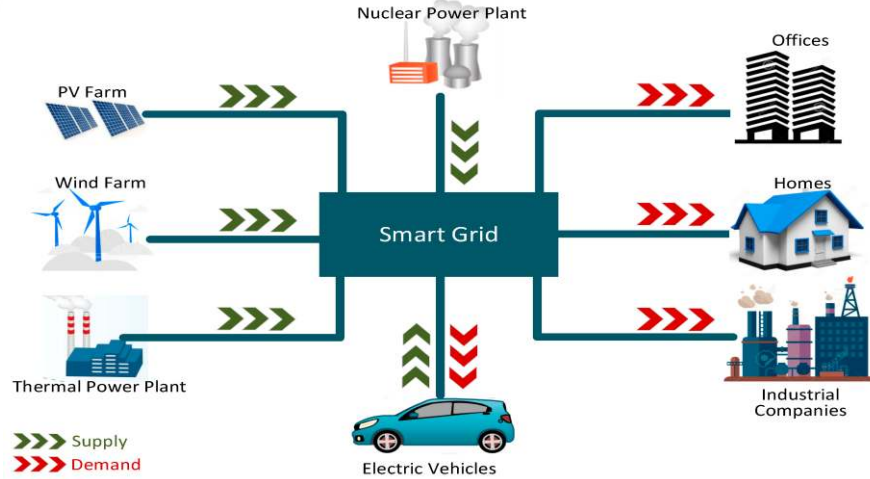
Elektrikli araçların sürdürülebilir kalkınmaya katkısı, çevresel ve ekonomik boyutun ötesinde, halk sağlığı ve sosyal refah konularında da kendini göstermektedir. Geleneksel otomobillerin egzoz emisyonları, özellikle yoğun kent merkezlerinde hava kirliliğine yol açarak solunum yolu hastalıklarından kalp-damar rahatsızlıklarına kadar geniş bir yelpazede sağlık sorununa sebebiyet vermektedir (Mishra & Saxena, 2021, s. 35188). Elektrikli araçlar ise batarya ve elektrik motoru kombinasyonu sayesinde

yolculuk sırasında egzoz emisyonu oluşturmaz; sadece elektrik üretim sürecinde, eğer fosil kaynaklar devreye giriyorsa dolaylı emisyon söz konusu olabilir. Dolayısıyla, şebekenin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla beslenmesi oranında, elektrikli araçların net emisyonu ciddi şekilde düşer ve kent içi hava kalitesi iyileşir (Brand, King, & Montague, 2021, s. 2). Bu iyileşmenin toplum sağlığı üzerindeki yansımaları, hastalık yükünün azalması, sağlık harcamalarındaki azalma ve genel yaşam kalitesinin yükselmesi şeklinde özetlenebilir. Elektrikli ulaşımın sağladığı bir diğer toplumsal fayda, gürültü kirliliğini azaltmasıdır. İçten yanmalı motorların yüksek devri ve egzoz sesi, özellikle kalabalık şehirlerde ciddi bir gürültü problemi oluşturur (Heidrich et al., 2017, s. 1503). Elektrikli araçlar çok daha sessiz çalıştığından, gece saatlerinde veya düşük hızda trafikte rahatsız edici gürültü seviyesini minimuma indirir. Bu, konut bölgelerinde ya da okul, hastane gibi hassas mekânların çevresinde yaşayanlar için önemli bir konfor artışıdır (Mishra & Saxena, 2021, s. 35190). Ayrıca işitme sağlığı başta olmak üzere ruhsal dinginlik ve stres azaltımı gibi faktörler de sosyal refaha olumlu katkı sunar (Brand et al., 2021, s. 4). Bu açıdan bakıldığında, elektrikli araçların sadece bireysel kullanıcıya değil, geniş toplum kesimlerine de fayda sağladığı; sürdürülebilir kalkınmanın sağlık ve refah hedeflerini (SDG 3) desteklediği söylenebilir. Sosyal refahın artmasında, elektrikli araçların getirdiği yeni ekonomik modellerin payı da büyüktür. Elektrikli scooter, elektrikli bisiklet, araç paylaşım platformları, otonom taksi hizmetleri gibi yenilikçi ulaşım çözümleri, kentli nüfusa daha erişilebilir, sessiz ve temiz ulaşım alternatifi sağlamaktadır (Lu et al., 2020, s. 6). Bu yeni çözümler, toplu taşıma sistemleriyle entegre edildiğinde, kişisel otomobil sahipliğine olan bağımlılığı azaltarak trafik sıkışıklığı, otopark alanları sıkıntısı gibi sorunları hafifletebilir (Dong et al., 2014, s. 49). Pek çok yerel yönetim, elektrikli mikromobilité araçlarını teşvik eden düzenlemeler ve altyapı yatırımlarıyla, kent içi hareketliliği akıcı, sağlıklı ve paylaşımlı hale getirmeyi hedeflemektedir (Brand et al., 2021, s. 3). Sonuçta, hava kirliliğini ve gürültüyü azaltan, daha düşük işletme maliyetli ve akıllı şehir uygulamalarıyla entegre edilebilen elektrikli ulaşım seçenekleri, sosyal eşitsizlikleri azaltma yönünde de katkı sağlayabilir. Zira düşük gelirli haneler bile paylaşımlı elektrikli mobilité hizmetleri aracılığıyla uygun fiyatlı ulaşım olanağına erişebilir (Heidrich et al., 2017, s. 1509). Dolayısıyla elektrikli araçlar, sağlık ve sosyal refah alanında “temiz hava, sessiz şehirler ve erişilebilir ulaşım” hedeflerini gerçekleştirme yönünde ciddi bir fırsat ortaya koyar. Sadece emisyon azaltımı değil, aynı zamanda kentlerin yaşanabilirliğini yükselten gürültü kirliliğinin azalması ve

ulaşım hizmetlerinin çeşitlenmesi sayesinde, sürdürülebilir kalkınmanın sosyal boyutları kuvvetlenir (Toksöz, 2020, s. 71). Mevcut araştırmalar, elektrikli araçların yaygınlaşmasının özellikle çocuklar, yaşlılar ve solunum yolu hastalığı olan bireyler üzerinde olumlu etkiler doğurduğunu; uzun vadede kamu sağlık harcamalarını da azaltarak toplumsal refaha katkı sunduğunu göstermektedir (Mishra & Saxena, 2021, s. 35191).

Elektrikli araçlar, sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu şehir planlaması ve akıllı ulaşım sistemleri geliştirme konusunda da önemli bir rol oynamaktadır. Nüfus yoğunluğunun artması, kent içi alanların kısıtlı olması ve trafik tıkanıklığı, şehirleri ciddi altyapı sorunlarıyla karşı karşıya bırakırken, geleneksel ulaşım modelleri bu sorunlara kalıcı çözümler üretmekte zorlanmaktadır (Brand et al., 2021, s. 6).

Resim 5: Akıllı şebeke (Smart Grid) ve Araçtan şebekeye (V2G) Entegrasyonu



Kaynak: (İnci, elik, Lashab, Bayındır, Vasquez, Guerrero, 2024, s. 4)

Elektrikli araçlar ise sadece temiz bir ulaşım aracı olmakla kalmayıp, akıllı şebeke (smart grid) entegrasyonu, araçtan şebekeye (V2G) enerji aktarımı ve paylaşımlı mobilite hizmetleri gibi yenilikçi uygulamalarla şehir planlaması yaklaşımlarına taze bir soluk getirebilir (Heidrich et al., 2017, s. 1505). Özellikle

büyükşehirlerde hızlı şarj istasyonlarının konumlandırılması, otoparkların elektrik altyapısıyla donatılması ve bu noktaların güneş/rüzgâr enerjisi ile beslenmesi, kentle ulaşım arasındaki ilişkiyi sürdürülebilirlik ekseninde yeniden tanımlar (Dong et al., 2014, s. 51). Akıllı ulaşım sistemleri (AUS), genellikle sensör teknolojileri, yapay zekâ destekli trafik yönetimi, otonom araçlar ve bulut tabanlı veri analizleriyle biçimlenmektedir. Elektrikli araçlar, bu ekosistemin doğal bir parçası olarak görülmekte; gerçek zamanlı rota optimizasyonu ve şarj planlaması sayesinde trafik sıkışıklığı ve enerji tüketimi azaltılabilmektedir (Lu et al., 2020, s. 7). Örneğin, kent içi trafik yoğunluğu yüksek bir bölgede, akıllı trafik lambalarından veya merkezi yönetim sisteminden gelen verilerle EA sahiplerine alternatif güzergahtan ilerleme veya yakındaki boş şarj istasyonuna yönelme önerisi sunulabilir. Aynı zamanda, şebekeye enerji geri beslemesi (V2G) yoluyla talep zirveleri dengelenebilir; bu yaklaşım, şehirlerin elektrik altyapısına da katkı sağlayarak daha az ek santral yatırım ihtiyacı doğurur (Brand et al., 2021, s. 8). Şehir planlaması ve akıllı ulaşım sistemleri boyutunda, toplu taşıma filolarının elektrikli modellere geçişi de ciddi fırsatlar barındırır. Elektrikli otobüsler, tramvaylar veya hafif raylı sistemler, şehir merkezlerinde hava kalitesini iyileştirirken gürültü kirliliğini de asgari düzeye indirir (Toksöz, 2020, s. 74). Metrobüs veya trolleybüs gibi çözümler, elektriğin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması halinde neredeyse sıfır emisyonlu toplu taşıma alternatifi sunar. Bu gelişmeler, sokakların yayalara ve bisikletlere açılması, karbon nötr mahalleler veya düşük/ultra düşük emisyon bölgeleri gibi kentsel dönüşüm projeleriyle bütünleştiğinde, şehirlerin insan odaklı, yeşil ve sağlıklı bir yapıya kavuşmasında kilit rol oynar (Heidrich et al., 2017, s. 1506). Bu dönüşüm sürecinde, planlayıcılar ve yerel yönetimler, elektrikli araçlar için ayrılan özel şeritler, park alanlarında şarj üniteleri, ticari bölgeler için lojistik çözümler gibi detayları da göz önünde bulundurarak kenti yeniden tasarlayabilir (Dong et al., 2014, s. 53). Bu bağlamda, elektrikli araçlar sadece “temiz araç” kimliğiyle değil, şehirlerin sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda yeniden planlanmasında da bir katalizör görevi üstlenir (Tury, 2019, s. 114). Akıllı ulaşım sistemleri ve elektrikli mobilite projeleri; enerji verimliliği, emisyon azaltımı, gürültü kirliliğinin kontrolü ve kentli nüfusa erişilebilir, güvenli ulaşım sağlama gibi alanlarda somut ilerlemeler getirebilir (Brand et al., 2021, s. 10). Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri’nin (SDG 11) vurguladığı “sürdürülebilir kentler ve topluluklar” perspektifi, bu tür teknolojik ve planlama yenilikleri sayesinde desteklenir. Uzun vadede, elektrikli araçların

yaygınlaşması ve şehir planlamasıyla entegrasyonu, hem ekonomide yeşil büyüme trendine hizmet eder hem de toplumsal refahı ve çevre kalitesini aynı anda yükseltir (Mishra & Saxena, 2021, s. 35192). Sürdürülebilir kalkınma, sadece çevresel koruma değil aynı zamanda ekonomik ve sosyal kazanımları da içeren bütüncül bir yaklaşımı ifade eder. Elektrikli araçlar bu çerçevede önemli bir kaldıraç işlevi görür (TÜBİTAK, 2020, s. 76).

3.3.5. Yeni İş ve Yatırım Fırsatları

Elektrikli araçlar (EA) hızla yaygınlaşırken, bu araçlarda kullanılan lityum-iyon bataryaların uzun vadeli yönetimi ve sürdürülebilirliği giderek daha fazla dikkat çekmektedir. Zira bir elektrikli araç bataryasının ömrünün sonuna yaklaştığında ortaya çıkan geri dönüşüm ve ikinci ömür (second-life) seçenekleri, günümüzde önemli bir iş ve yatırım fırsatı olarak değerlendirilmektedir (Harper et al., 2019, s. 75). Batarya bileşenlerinde lityum, kobalt, nikel gibi stratejik metallerin bulunması, bu metallerin geri kazanımını ekonomik açıdan cazip hâle getirmekte; aynı zamanda çevre dostu bir döngüsel ekonomi modelini güçlendirmektedir (IEA, 2022, s. 42). İkinci ömür uygulamalarında ise, elektrikli araçlardan çıkarılan bataryaların kapasitesinin belirli bir kısmı düşmüş olsa bile farklı alanlarda (örneğin, ev tipi veya endüstriyel enerji depolama, şebeke dengeleme) kullanılabilmesi öngörülmektedir (Said, Qazi, & Batool, 2021, s. 128217). Bu kapsamda, batarya geri dönüşüm sektörünün orta ve uzun vadede milyarlarca dolarlık bir pazara dönüşeceği tahmin edilmektedir (BloombergNEF, 2022). Zira lityum-iyon hücrelerin kimyasal geri kazanım süreçleri (hidrometalurji, pirometalurji, vb.) teknik olarak karmaşık olsa da, hammadde fiyatlarının yükselmesi ve stratejik metal kaynaklarının sınırlı olması, geri dönüşüm yatırımlarının geri ödeme süresini kısaltmaktadır (Harper et al., 2019, s. 77). Ek olarak, Avrupa Birliği başta olmak üzere pek çok bölgede çevre mevzuatı, batarya atık yönetimi ve üreticilere yönelik geri toplama sorumluluğu konularında katı düzenlemeler içermektedir. Bu durum, geri dönüşüm tesislerinin lisanslanması ve ölçek büyütme yönünde önemli teşvikler doğurmakta; istihdamı ve teknolojik uzmanlaşmayı da beraberinde getirmektedir (IEA, 2022, s. 45). Türkiye’de ve birçok gelişmekte olan ülkede, elektrikli araç pazarının büyümesine paralel şekilde batarya geri dönüşüm projelerinin de geliştirilmesi, aynı zamanda yerli sanayinin yüksek katma değerli alanlara yönelmesi açısından kritik görülmektedir (Toksöz, 2020, s. 69). İkinci ömür (second-life) uygulamaları, özellikle enerji depolama sektöründe çığır

açıcı bir yenilik olarak değerlendirilmektedir. Kullanım ömrünü elektrikli araçta tamamlamak üzere olan bataryalar, genelde orijinal kapasitesinin %70-80 seviyesinde bir performansla sabit depolama sistemlerinde kullanılabilmektedir (Said et al., 2021, s. 128217). Konutlarda güneş enerjisi fazlasını depolama, rüzgâr santrallerinde üretim dalgalanmalarını dengeleme veya ticari tesislerde “peak shaving” gibi stratejik amaçlarla bu pillerin devreye alınması hem enerji maliyetlerini düşürmekte hem de emisyon azaltım hedeflerine destek olmaktadır (IEA, 2022, s. 49). Dolayısıyla, batarya geri dönüşüm ve ikinci ömür uygulamalarından doğan yeni iş modelleri, tedarik zincirinde yer alan aktörler (otomobil üreticileri, enerji şirketleri, atık yönetimi firmaları, vb.) arasında farklı yatırım fırsatları yaratır. Bu model, yalnızca ekonomik getiri sağlamakla kalmaz, aynı zamanda döngüsel ekonomiye katkıda bulunarak sürdürülebilirlik ilkeleriyle de uyumlu bir ekosistem inşa eder (Harper et al., 2019, s. 83).

Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte ortaya çıkan bir diğer önemli fırsat alanı, şarj hizmetleri ve buna bağlı dijital platform çözümleridir. Günümüzde, pek çok tüketici elektrikli araç satın alma veya kiralama kararını “menzil kaygısı” ve “şarj erişilebilirliği” faktörlerini göz önünde bulundurarak vermektedir (IEA, 2022, s. 27). Dolayısıyla, hızlı şarj istasyonlarının kurulumu, bakım-onarımı, operasyonu ve servis yönetimi konularında faaliyet gösteren yeni girişimler ortaya çıkmaktadır. Bu girişimler, otoparklarda, alışveriş merkezlerinde, otoyol kenarlarında ya da kurumsal filoların deposunda şarj üniteleri açarak kullanıcı dostu platformlar geliştirmekte; böylelikle araç sahiplerine lokasyon, fiyatlandırma ve istasyon kapasitesi gibi bilgileri gerçek zamanlı sunabilmektedir (BloombergNEF, 2022). Dijital platformlar, şarj hizmetlerini akıllı telefon uygulamalarıyla entegre ederek bir ekosistem yaratmaktadır. Örneğin, sürücülere rota planlama, şarj istasyonu rezervasyonu, ödeme kolaylığı ve enerji tüketim takibi gibi özellikler sağlamak, kullanıcı deneyimini önemli ölçüde iyileştirir (Said et al., 2021, s. 128217). Bazı platformlar, elektrikli araç sürücülerinin evlerindeki fazla elektriği (örn. güneş panellerinden elde edilmiş) diğer sürücülerle paylaşımlarına bile olanak tanıyarak “paylaşımlı şarj ekonomisi” konseptini geliştirmiştir (Toksöz, 2020, s. 70). Bu gelişme, hem bireysel düzeyde ek gelir fırsatı yaratır hem de sistem genelinde yenilenebilir enerji kullanımını teşvik eder. Dolayısıyla, şarj altyapısı ve dijital platformların birleştiği bu noktada, yazılım geliştiricileri, enerji şirketleri, otomotiv üreticileri, finans kurumları gibi birçok paydaşın ortak projeleri söz konusu olmaktadır (Harper et al., 2019, s. 81). Ayrıca,

“akıllı şebeke” (smart grid) yaklaşımıyla şarj hizmetlerinin buluşması, elektrikli araçların hem tüketici hem de potansiyel enerji sağlayıcı (V2G) işlevini üstlenmesine olanak tanır. Bu durum, özellikle pik talep anlarında veya yenilenebilir enerji üretiminin fazla olduğu saatlerde, elektrikli araçların şebekeyi dengelemesine imkân veren karmaşık ve yaratıcı uygulamaları gündeme getirir (IEA, 2022, s. 50). Akıllı şarj protokolleri, sürücülerin elektrik maliyetlerini düşürebilir; şebekenin karbon yoğunluğunu optimize edebilir ve belki de araç sahibine ek gelir sağlayabilir. Böylece, şarj hizmeti sektöründe yalnızca fiziksel altyapı yatırımları değil, aynı zamanda veri analitiği, bulut bilişim ve yapay zekâ gibi dijital teknolojilere yapılan yatırımlar da ön plana çıkmaktadır (BloombergNEF, 2022). Sonuç olarak, elektrikli araç şarj hizmetleri ve dijital platformlar, yeni iş ve yatırım fırsatları için çekici bir ortam sunarken, kullanıcı deneyimini de sürekli iyileştirerek pazarın büyümesine katkıda bulunmaktadır (Said et al., 2021, s. 128217).

Elektrikli araçların yeni iş ve yatırım fırsatları oluşturduğu bir başka kritik eksen, uluslararası işbirlikleri ve ticarete dayalı avantajlardır. Lityum-iyon batarya üretiminde gerekli hammaddelerin (lityum, kobalt, nikel vb.) dağılımı dünya genelinde coğrafi olarak düzensizdir; bu durum, ülkeler arasında hammadde tedariki, işleme ve teknoloji transferi konularında geniş kapsamlı ticaret anlaşmalarına ve ortaklıklara yol açar (Harper et al., 2019, s. 84). Madencilik ve rafine tesislerine yatırım yapan ülkeler, küresel değer zincirinde stratejik bir konum kazanabilirken; teknoloji geliştiren ve üretim kabiliyeti yüksek olan ülkeler ise ileri batarya kimyası ve üretim know-how'ına sahip olmanın avantajını kullanırlar (IEA, 2022, s. 56). Bunun yanı sıra, elektrikli araç sektörüne yönelik uluslararası işbirlikleri sadece hammaddelerle sınırlı kalmaz; otomotiv üreticileri, yazılım şirketleri, enerji devleri ve lojistik firmaları arasında gerçekleşen ortak AR-GE projeleri de önemlidir (BloombergNEF, 2022). Örneğin, farklı bölge veya ülkelerden şirketlerin bir araya gelerek batarya üretim tesisleri kurması, yenilikçi malzeme araştırmaları yapması veya yeni nesil şarj teknolojileri üzerinde çalışması, bilgi paylaşımını hızlandırır ve üretim maliyetlerini düşürür (Said et al., 2021, s. 128217). Elektrikli araçların küresel ölçekte yaygınlaşmasıyla birlikte, özellikle Avrupa, Asya ve Kuzey Amerika'da yoğunlaşan üreticilerin kendi aralarında lisans anlaşmaları, ortak platform geliştirme, standardizasyon girişimleri gibi işbirlikleri yaptıkları görülmektedir (IEA, 2022, s. 59). Bu durum, pazarın büyümesini ve teknoloji transferini olumlu etkilediği gibi, sektör için küresel çapta yeni fırsatlar da doğurur. Uluslararası ticaret bağlamında, elektrikli araçlar ve bileşenleriyle ilgili

gümrük ve vergi düzenlemeleri de yeni iş fırsatları yaratabilir. Bazı ülkeler, elektrikli araç ithalatına veya batarya ihracatına özel teşvikler sunarak yerel pazarlarını büyütmek ve yabancı yatırım çekmek istemektedir (Toksöz, 2020, s. 73). Diğer yandan, karbon ayak izi yüksek ürünlere yönelik ek vergiler veya kota uygulamaları, fosil yakıtlı araçların rekabet gücünü zayıflatabilir ve elektrikli araç ticaretini destekleyebilir (IEA, 2022, s. 62). Özellikle “yeşil dönüşüm” politikaları kapsamında, uluslararası finans kuruluşları ve kalkınma bankaları, elektrikli araç ekosistemine yönelik projeleri fonlamakta, gelişmekte olan ülkelerde büyük ölçekli filoların elektrifikasyonunu kolaylaştırmaktadır (Said et al., 2021, s. 128217). Bu doğrultuda, küresel tedarik zinciri içinde yer almayı başaran yerli firmalar ve start-up’lar hem ihracat potansiyeli hem de yabancı sermaye ortaklıkları yoluyla hızla büyüme şansına sahip olmaktadır (Harper et al., 2019, s. 85). Sonuç olarak, elektrikli araçlar etrafında şekillenen yeni iş ve yatırım fırsatları, uluslararası alanda hammadde tedariki, teknoloji geliştirme, AR-GE işbirlikleri, lojistik ve ticari anlaşmalar gibi farklı alanları kapsamaktadır. Yerli ve yabancı yatırımcılar, elektrikli araç sektörünün dünya çapındaki büyüme trendini takip ederek üretim, hizmet ve ticaret boyutunda birçok yeni fırsatla karşı karşıya kalır (BloombergNEF, 2022). Bu da sektörün daha hızlı gelişmesine, yeni rekabetçi oyuncuların sahneye çıkmasına ve elektrikli araçların küresel piyasalarda kök salmasına olanak verir (IEA, 2022, s. 65).

3.4. Tehditler (Threats)

Elektrikli araç ekosisteminin gelişimi, olumlu unsurlar kadar risk ve belirsizlikleri de bünyesinde barındırmaktadır. Bu riskler, ekonomik, politik, teknolojik ve çevresel faktörler ekseninde şekillenir.

3.4.1. Ham Madde Kaynaklı Riskler ve Fiyat Dalgalanmaları

Elektrikli araçlar (EA), iklim değişikliğiyle mücadele ve enerji dönüşümü açısından büyük bir potansiyel taşısa da bu araçların üretimi, özellikle lityum, kobalt, nikel ve grafit gibi kritik minerallere olan talebi hızla artırmaktadır (IEA, 2021, s. 10). Bu minerallerin jeopolitik dağılımı ise dünya genelinde oldukça dengesiz bir yapı sergiler. Örneğin, kobalt üretiminin önemli bir bölümü Demokratik Kongo Cumhuriyeti’nde yoğunlaşırken, lityumun büyük rezervleri Latin Amerika’daki “lityum üçgeni” olarak adlandırılan Arjantin, Bolivya ve Şili’de bulunmaktadır (Sovacool, Graaf, & Bakker, 2018, s. 206). Aynı şekilde nikel ve nadir toprak

elementleri de belirli ülkelerin egemenliğinde çıkartılmakta ve işlenmektedir. Bu durum, elektrikli araç üretim zincirinde coğrafi ve politik riskler yaratır: Siyasi istikrarsızlık, çalışma koşullarındaki sorunlar veya altyapı eksikleri, küresel tedarik için engel oluşturabilir (Harper et al., 2019, s. 78). Kritik minerallerin jeopolitik yoğunlaşması, elektrikli araçlar için batarya maliyetlerini ve üretim kapasitelerini doğrudan etkiler. Ham madde rezervlerinin belirli ülkelerde toplanması, tedarik zincirinde tekelci durumlar oluşturabilir ve fiyat dalgalanmalarına zemin hazırlar (IEA, 2021, s. 12). Ülkeler, ham madde ihracatına yönelik regülasyonlarını sıkılaştırarak veya kota uygulayarak küresel piyasadaki arzı kısıtlayabilir. Bunun sonucunda, elektrikli araç üreticileri hammadde bulmakta zorlanabilir veya daha yüksek fiyatlardan satın almak durumunda kalabilir (Sovacool et al., 2018, s. 209). Ayrıca, bu kritik minerallerin çıkarıldığı bölgelerdeki sosyal ve çevresel maliyetler de dikkate değer: Madencilik faaliyetleri nedeniyle yerel toplulukların yaşam alanları zarar görebilir, çalışma koşulları insan hakları standartlarının gerisinde kalabilir. Tüm bu etkenler, sadece fiyat dalgalanmaları açısından değil; sürdürülebilirlik ve kurumsal sorumluluk ilkeleri bakımından da elektrikli araç sektörünü zora sokan bir tehdittir (Toksöz, 2020, s. 65). Uluslararası kurumlar ve hükümetler, kritik minerallerin jeopolitik yoğunlaşması sorununu hafifletmek amacıyla bazı iş birliği girişimleri ve stratejik rezerv politikaları geliştirmektedir. Örneğin, tedarikçi ülkelere teknoloji transferi yaparak verimliliği artırmayı, aynı zamanda sosyal ve çevresel standartları yükseltmeyi amaçlayan programlar hayata geçirilmektedir (IEA, 2021, s. 15). Bunlar, belirli bir ölçüde riskleri azaltsa da elektrikli araçlar pazarının hızla büyüdüğü şu dönemde jeopolitik faktörler, küresel arz-talep dengesini uzun süre etkilemeye devam edecektir (Sovacool et al., 2018, s. 211). Bu nedenle, üretici ülkelerin istikrarı ve tedarikçilerin etik madencilik uygulamalarını benimsemesi, elektrikli araç ekosisteminin orta ve uzun vadede başarısı için kritik önem taşımaktadır.

Hammadde kaynaklı riskler ve fiyat dalgalanmalarının temel unsurlarından biri de küresel talebin giderek artmasına bağlı olarak maden fiyatlarının yükselmesidir. Elektrikli araç endüstrisi büyüdükçe, pillerde kullanılan lityum, kobalt, nikel gibi minerallerin arzı talebe yetişmekte zorlanabilir; bu da fiyatları yukarı çeker (Harper et al., 2019, s. 81). Son yıllarda özellikle kobaltın fiyatında gözlemlenen dalgalanmalar, üreticiler açısından öngörülemeyen maliyet artışlarına ve tedarik planlamasında güçlük çekmeye yol açmıştır (IEA, 2021, s. 22). Cobalt Price Index gibi endekslerde 2016-2018 arasında iki kattan fazla artış yaşanması, batarya üreticilerini farklı

kimyasal seçeneklere yönelmeye itmiş; kobalt içeriğini azaltan NCM (Nikel-Kobalt-Manganez) varyantları veya kobalt içermeyen lityum-demir-fosfat (LFP) kimyaları daha cazip hale gelmiştir (Sovacool et al., 2018, s. 213). Hammadde fiyatlarının artışının bir diğer sebebi de yatırım yetersizliği ve uzun proje geliştirme süreleridir. Yeni bir lityum madeni veya kobalt rafineri tesisi kurmak, genellikle yüksek sermaye gerektiren ve çevresel izin süreçleri nedeniyle uzayan bir süreçtir (Toksöz, 2020, s. 68). Dolayısıyla, talep hızla yükselse bile, arz tarafının aynı süratle kapasite artırması mümkün olmayabilir. Bu “arz esnekliği” düşük olduğunda, küçük şoklar bile fiyatların ciddi şekilde yukarı yönlü hareket etmesine sebep olur (Harper et al., 2019, s. 83). Üretici firmalar, uzun vadeli tedarik anlaşmaları veya maden hisselerine doğrudan yatırım yaparak bu riski yönetmeye çalışsa da küresel piyasalarda jeopolitik gelişmeler veya lojistik sıkıntılar gibi faktörler beklenmedik fiyat sıçramalarına yol açabilmektedir (IEA, 2021, s. 25). Hammadde fiyat artışları, elektrikli araçların tüketici nezdindeki rekabet gücünü de doğrudan etkiler. Batarya maliyetleri, bir elektrikli otomobilin toplam üretim giderlerinin önemli bir kısmını oluşturduğundan, metal fiyatlarındaki yükseliş satış fiyatına da yansiyabilir (Sovacool et al., 2018, s. 215). Bu durum, hükümet teşvikleri ve ölçek ekonomileriyle kısmen dengelenebilse de orta vadede üreticilerin kârlılık ve tüketicilerin satın alma iştahı bakımından risk unsurudur (Toksöz, 2020, s. 70). Bazı uzmanlar, ikinci el batarya piyasasının büyümesi, geri dönüşüm teknolojilerinin gelişmesi ve alternatif batarya kimyalarının ticarileşmesi yoluyla bu fiyat riskinin azaltılabileceğini öne sürmektedir. Yine de küresel ekonomik belirsizlik, arz-talep dengesizliği ve spekülasyon etkenleri, hammadde fiyat dalgalanmalarının elektrikli araç sektörünün uzun vadeli istikrarını tehdit eden başlıca faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Harper et al., 2019, s. 85).

Elektrikli araçlar için gerekli mineral ve metal tedarikinde yaşanan riskler, sektörün sürdürülebilir büyümesini tehlikeye sokabileceğinden, “tedarik zinciri güvencesi” giderek daha stratejik bir hedef haline gelmektedir (IEA, 2021, s. 30). Bu çerçevede, otomotiv ve batarya üreticileri, hammadde kaynağına daha yakın konumlanmak veya doğrudan maden işletmelerine yatırım yapmak yoluyla arz zincirini dikey olarak bütünleştirmeye çalışırlar (Sovacool et al., 2018, s. 217). Örneğin, bazı büyük şirketlerin Afrika ve Güney Amerika’da madencilik faaliyetlerine ortak olması veya uzun vadeli satın alma anlaşmaları yapması, fiyat ve tedarik istikrarı sağlama amaçlıdır. Aynı şekilde, hükümetler de stratejik rezerv politikaları veya ikili anlaşmalarla kendi sanayilerinin hammadde ihtiyacını güvence altına almayı

hedefleyebilmektedir (Harper et al., 2019, s. 86). Tedarik zinciri güvencesinin bir diğer boyutu, “döngüsel ekonomi” yaklaşımı ve geri dönüşüm teknolojilerinin yaygınlaşmasıdır. Kullanılmış bataryaların geri dönüştürülmesi, lityum, kobalt, nikel gibi kritik metallerin tekrar pazara kazandırılmasını sağlayarak ilk madencilik faaliyetine olan bağımlılığı kısmen azaltır (Toksöz, 2020, s. 72). Ancak, geri dönüşüm süreçleri henüz ölçek ekonomileriyle tam olarak örtüşmemiş durumda olup, teknolojik ve ekonomik açıdan gelişim sürecindedir. Yine de uzun vadede geri dönüşüm kapasitesinin artması, elektrikli araçların hammadde riskini hafifletmeye yardımcı olacak kritik bir adımdır (IEA, 2021, s. 33). Bazı ülkelerde, üreticilerin batarya atık yönetimi sorumluluklarını zorunlu kılan düzenlemeler devrededir ve bu yaklaşım, sistematik bir geri dönüşüm ekosistemi oluşturmayı hedeflemektedir (Harper et al., 2019, s. 88). Son olarak, tedarik zinciri güvencesinin sağlanması, sadece ekonomik ve teknolojik önlemlerle değil, aynı zamanda etik ve sosyal standartların yükseltilmesiyle de bağlantılıdır. Bir maden sahasından gelen hammaddenin menşei, çıkarma koşulları, işçi hakları ve çevre koruma uygulamaları gibi hususlar, küresel otomotiv ve teknoloji firmalarının kurumsal sorumluluk politikaları açısından giderek önem kazanmaktadır (Sovacool et al., 2018, s. 219). “Sorumlu tedarik” (responsible sourcing) adı altında, jeopolitik riskleri en aza indirmenin yanı sıra sosyal sürdürülebilirlik ve çevre koruma ilkelerini de uygulamaya koymak sektörün temel hedeflerinden biridir (Toksöz, 2020, s. 75). Bu yaklaşım, elektrikli araç ekosisteminin büyümesini yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda etik bir zeminde sürdürmesini sağlar; böylece hammadde kaynaklı riskler ve fiyat dalgalanmaları, paydaşların iş birliğiyle yönetilebilir hale gelir (IEA, 2021, s. 36).

3.4.2. Altyapı Yatırımlarının Yetersizliği

Elektrikli araçların (EA) hızlı yaygınlaşması, ulaşım sektörünün karbonsuzlaşması ve şehirlerde hava kalitesinin iyileştirilmesi açısından önemli bir fırsat sunsa da bu dönüşümün başarılı olabilmesi için gerekli altyapı yatırımları kritik bir role sahiptir (IEA, 2022, s. 25). Elektrikli araçların şarj edilmesine yönelik istasyonların kurulumu, mevcut elektrik şebekesinin güçlendirilmesi, trafoların kapasite artırımı ve akıllı şebeke (smart grid) uygulamalarının devreye alınması gibi kalemler, genellikle yüksek maliyetli ve planlama açısından karmaşık projelerdir (ACEA, 2022, s. 4). Bu noktada, devletlerin kamu kaynaklarından ayırdığı bütçe sınırlı olabilir. Özellikle ekonomik sıkıntı yaşayan veya öncelik alanları sağlık, eğitim gibi

temel hizmetlere yönelen ülkelerde, elektrikli araç altyapısının finansmanı ikinci planda kalma riskiyle karşı karşıyadır (BloombergNEF, 2022). Kamu bütçelerinin sınırlılığı, genelde merkezi yönetimlerin ve yerel idarelerin aynı anda birden çok projeye ilgilenmesinden kaynaklanır. Yol yapımı, toplu taşıma yatırımları, atık su arıtma tesisleri gibi altyapı projeleri arasında önceliklendirme yapmak zorunlu hâle gelir ve elektrikli araçlar için gerekli olan şarj istasyonlarının yaygınlaştırılması bu yarışta her zaman öncelik kazanamayabilir (IEA, 2022, s. 28). Ayrıca, birçok hükümet, vergi indirimleri veya hibe programları aracılığıyla EA satın alımını teşvik etmeyi tercih ederken, şarj altyapısını geliştirmek için gereken kaynakları ikincil plana bırakabilmektedir (ACEA, 2022, s. 5). Bunun sonucunda, araç sayısı hızla artarken destekleyici şarj ağının aynı tempoyla büyümemesi, tüketicilerde “menzil kaygısı” ve altyapıya güvensizlik oluşmasına sebep olabilir. Nitekim bazı raporlarda, otomobil satışlarının ivme kazandığı ancak kamu altyapısının geride kaldığı ülkelerde elektrikli araç kullanım deneyiminin olumsuz etkilendiği belirtilmektedir (BloombergNEF, 2022). Kamu kaynaklarının yetersizliği, kısa vadede hükümetlerin özel sektörle ortak yatırım modelleri aramasına da yol açar (Toksöz, 2020, s. 60). Kamu-özel iş birlikleri (PPP) ve enerji şirketleriyle yapılacak anlaşmalar sayesinde, şarj istasyonlarının otoyol kenarlarında, şehir merkezlerinde ve kırsal alanlarda yaygınlaştırılması hedeflenir. Ancak bu girişimlerin planlama, finansman ve bürokratik izin süreçleri de genellikle uzun sürmekte; ilk etapta beklenen oranda kapsayıcı bir altyapı oluşturulamamaktadır (IEA, 2022, s. 31). Bu gecikme ve finansman kısıtları, elektrikli araç piyasasında rekabetçi fiyat seviyelerine ulaşılsa bile, kullanıcı deneyimini gölgeleyerek sektörün büyüme hızını tehdit edebilir. Dolayısıyla, elektrikli araç altyapısının eksik kalması, “tehdit unsurlarından biri” olarak öne çıkmakta ve eğer kamu bütçesinden yeterli pay ayrılmazsa, EA ekosisteminin orta-uzun vadede sürdürülebilirliği sektöre uğrayabilir (Toksöz, 2020, s. 63).

Altyapı yatırımlarının yetersiz kalmasının bir diğer nedeni, özel sektörün elektrikli araçlar konusundaki ilgisizliği veya bekle-gör tutumudur. Şarj istasyonu kurmak veya elektrik altyapısını güçlendirmek, özel girişimciler açısından yüksek maliyetli ve kâr marjı belirsiz bir yatırım olarak görülmektedir (IEA, 2022, s. 34). Özellikle elektrikli araç sayısının henüz toplam otomobil pazarının küçük bir bölümünü oluşturduğu ülkelerde, özel sektör yatırımcıları “talep yetersizliği” endişesiyle şarj altyapısına büyük ölçekte yatırım yapmaktan kaçınabilmektedir (BloombergNEF, 2022). Bu tutum, piyasadaki araç sayısı arttıkça kârlılık yükselir

düşüncesine dayanan bir bekleyişi temsil eder ancak altyapı olmadan araç satışlarının hızlanması da zordur. Böylece bir kısır döngü oluşur ve elektrikli araç piyasasının genel gelişimi yavaşlar (ACEA, 2022, s. 7). Özel sektörün çekimser kalmasında, uzun dönemde yatırımın geri dönüş süresine ilişkin belirsizlik de rol oynar. Şarj istasyonları, işletme giderleri (enerji alım anlaşmaları, bakım vb.) ve arazi kiralari gibi maliyetleri içerir; ayrıca hatırı sayılır bir kurulum maliyeti gerektirir (Toksöz, 2020, s. 65). Elektrik tarifelerindeki dalgalanmalar, regülasyon değişiklikleri veya tüketici tercihlerini etkileyen vergi düzenlemeleri gibi faktörler, uzun vadeli projeksiyonlar yapmayı zorlaştırır. Dolayısıyla, girişimciler riski yüksek olan bu sektöre adım atmak için devletin teşvik paketlerini ve düzenleyici çerçeveyi netleştirmesini bekleyebilir (IEA, 2022, s. 37). Bazı ülkelerde, hızlı şarj istasyonları veya akıllı şebeke entegrasyon projeleri gibi öncü yatırımlar kısmen kamusal fonlarla desteklense de bu fonların yetersiz kalması veya bürokratik süreçlerin uzunluğu, özel sektörün motivasyonunu düşürebilir. Buna ek olarak, altyapı kurulumunda ortak standartlar ve teknolojik uyum eksikliği, özel şirketlerin bekle-gör stratejisini tetikler (ACEA, 2022, s. 10). Farklı hızlı şarj protokollerinin (CHAdemo, CCS vb.) aynı anda desteklenmesi, ödeme sistemlerindeki çeşitlilik veya lisans süreçlerindeki karmaşa, firmalar için işletme riskini yükseltir (BloombergNEF, 2022). Yeterince kârlı görünmeyen ve henüz olgunlaşmamış bu pazarda öne çıkmak isteyen teknoloji şirketleri ve enerji devleri olsa da çoğu zaman yaygın ve entegre bir ağ oluşturacak kadar yatırım birikimi sağlamak zordur (Toksöz, 2020, s. 67). Sonuç olarak, özel sektörün yetersiz veya gecikmeli ilgisi, kamu altyapısının da zayıf kaldığı ortamlarda elektrikli araç gelişimini ciddi biçimde tehdit eden bir unsur haline gelir (IEA, 2022, s. 39).

Altyapı yetersizliğinin bir diğer önemli boyutu, ülkelerin coğrafi ve demografik özelliklerinden kaynaklanan zorluklardır. Geniş yüz ölçümüne sahip ve nüfus yoğunluğunun düşük olduğu bölgelerde şarj istasyonu kurmak, kârlılık açısından zayıf bir yatırım olarak değerlendirilebilir (Toksöz, 2020, s. 70). Örneğin, kırsal veya dağlık alanlarda yaşanan elektrik kesintileri, alt yapı hizmetlerinin zaten maliyetli olması ve kullanıcı sayısının azlığı, yatırımcıların bu bölgeleri ihmal etmesine yol açar (IEA, 2022, s. 42). Halbuki elektrikli araç ekosisteminin gerçekten kapsayıcı olması için, sadece metropollerde değil, ülkenin geneline yayılmış bir şarj ağı gereklidir; aksi takdirde uzun mesafeli seyahatler veya kırsal kesimde yaşayan sürücüler için elektrikli araç kullanımı cazibesini yitirebilir (ACEA, 2022, s. 12). Coğrafi engeller, sadece kırsal bölgelerle sınırlı kalmaz; bazı şehirlerde tarihi dokunun

korunması, yoğun kentsel dönüşüm veya doğal alanların varlığı nedeniyle kapsamlı altyapı inşası güçleşir (BloombergNEF, 2022). Ayrıca, demografik faktörler de devreye girer: Hızlı nüfus artışı, göç hareketleri veya ekonomik farklılıklar, şarj altyapısını planlamayı zorlaştırır. Örneğin, düşük gelirli mahallelerde, bina yönetmeliği açısından eski yapılar nedeniyle özel şarj ünitelerinin kurulumu sınırlı kalabilir (IEA, 2022, s. 45). Büyük apartman komplekslerinde park alanlarının yetersiz olması, altyapı maliyetlerini katlayarak tüketici ilgisini düşürebilir. Bu durum, elektrikli araçları daha çok yüksek gelir düzeyine sahip ve müstakil konutlarda yaşayan kesimlerin erişebildiği bir lüks seçenek hâline getirebilir (ACEA, 2022, s. 14). Ayrıca, coğrafi çeşitlilik ve demografik özellikler nedeniyle altyapının standartlaşması da zorlaşır. Kısa mesafe ve kent içi mobiliteye odaklanan şehirlerde daha fazla hızlı şarj ünitesine ihtiyaç duyulurken, otoyol ağı geniş veya kırsal nüfusu fazla ülkelerde “ultra hızlı” şarj istasyonlarıyla menzil problemini çözme gereksinimi öne çıkar (Toksöz, 2020, s. 73). Ancak bu tür projelerin yatırım maliyeti yüksek ve geri dönüşü belirsiz olduğu için hem kamu hem özel sektör açısından cazibe kaybına yol açabilir (IEA, 2022, s. 47). Dolayısıyla, coğrafi ve demografik engeller, altyapı yetersizliğini katmerlendiren, dolayısıyla elektrikli araçların yaygınlaşmasını tehdit eden güçlü bir unsurdur. Yerel şartlara uygun teşvik politikaları, akıllı şehir planlamaları ve esnek finansman mekanizmaları gibi çözümler geliştirilmediği sürece, bu engeller sektörün büyüme hızını yavaşlatmaya devam edecektir (BloombergNEF, 2022).

3.4.3. Fosil Yakıt Lobilerinin ve Geleneksel Otomotiv Sektörünün Baskısı

Elektrikli araçların (EA) iklim değişikliğiyle mücadele, enerji güvenliği ve hava kalitesi gibi kritik konularda sunduğu fırsatlar giderek daha fazla kabul görmekle birlikte, fosil yakıt endüstrisi ve geleneksel otomotiv sektörü, bu dönüşüme karşı çeşitli düzeylerde direnç göstermektedir (Healy & Barry, 2017, s. 452). Tarihsel olarak bakıldığında, petrol ve doğal gaz şirketleri, küresel ekonomide stratejik öneme sahip olmaları nedeniyle politik ve finansal nüfuzu yüksek aktörler olarak öne çıkmıştır. Bu firmaların, politikacılar ve düzenleyiciler nezdinde lobi faaliyetleri yürütmek suretiyle iklim politikalarını yumuşattığı veya fosil yakıt teşviklerinin sürmesini sağladığı birçok çalışmada belirtilmiştir (Transport & Environment, 2022, s. 4). Buna paralel olarak, geleneksel otomotiv üreticileri de uzun yıllara dayanan teknik altyapı, tedarik zinciri ve iş gücü yapısını koruma eğilimindedir. İçten yanmalı motor (IYMA) odaklı AR-GE yatırımları, yan sanayi sektörünün büyüklüğü ve mevcut fabrika düzenleri,

elektrikli araçların hızlı bir şekilde benimsenmesine karşı içsel bir tutuculuk geliştirmiştir (IEA, 2022, s. 19). Bazı markalar her ne kadar elektrikli modellere yatırım yapsa da fosil yakıt lobilerinin destekleriyle bir araya gelerek elektrikli araçlar lehine olan mevzuat ve vergilendirme politikasını geciktirmeye veya zayıflatmaya çalışabilmektedir (Healy & Barry, 2017, s. 454). Örneğin, katı emisyon standartlarının ertelenmesi, egzoz emisyon testlerinde ortaya çıkan manipülasyonlar veya karbon fiyatlandırma mekanizmalarına karşı çıkışlar, bu direnç stratejisine örnek olarak gösterilebilir. Diğer bir ifadeyle, elektrikli araçlar etrafında oluşan yenilikçi ekosistem ile fosil yakıt/geleneksel otomotiv sektörleri arasında yaşanan sürtünme, “sektörel direnç” ve “yoğun lobicilik” olarak tanımlanabilir. Söz konusu şirketler, kârlılıklarını ve pazar paylarını korumak adına elektrikli mobilitenin yaygınlaşmasını yavaşlatacak taktiklere başvurabilmekte, böylelikle iklim odaklı politikaların uygulanmasında engelleyici bir rol oynayabilmektedir (Transport & Environment, 2022, s. 7). Özellikle petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar, ülkelerin fosil yakıtlara dayalı vergi gelirleri ve otomotiv sektörünün istihdama katkısı göz önüne alındığında, siyasal aktörlerin de bu lobicilik faaliyetlerine kayıtsız kalmadığı görülmektedir (Toksöz, 2020, s. 56). Dolayısıyla, sektörel direnç ve lobicilik, elektrikli araçlar açısından önemli bir tehdit oluşturmakta; bu dönüşümün hızını ve kapsamını doğrudan etkilemektedir.

Fosil yakıt lobileri ve geleneksel otomotiv sektörü, yalnızca politik baskı yoluyla değil, aynı zamanda mevcut akaryakıt altyapısına yapılan yatırımları sürdürerek de elektrikli araçların yaygınlaşmasını zorlaştırır. Yıllar içinde inşa edilen benzin ve dizel dağıtım ağları, rafineriler, petrol boru hatları ve sayısız servis istasyonu, hâlihazırda yüksek düzeyde kapasiteli ve etkin bir hizmet ağı sunmaktadır (IEA, 2022, s. 25). Bu altyapının korunması ve genişletilmesi, önemli miktarda sermaye yatırımı ve işletme sübvansiyonları gerektirir. Dolayısıyla, fosil yakıt şirketleri ve bu şirketlerle bağlantılı finans kuruluşları, elektrikli şarj istasyonlarının yaygınlaşması veya akıllı şebeke teknolojilerine yatırım yapılması yerine konvansiyonel altyapıyı modernize etmeye veya kapasite arttırmaya öncelik verebilir (Toksöz, 2020, s. 59). Bu durum, “Mevcut altyapıya yatırımların sürmesi” olarak adlandırılan bir patika bağımlılığı (path dependency) yaratır. Kökü on yıllara dayanan bu sistem, bakım-onarım ve yenileme çalışmalarıyla kendini sürekli yeniler. Dolayısıyla, karar vericiler, “kısa vadede” daha hesaplı gibi görünen fosil yakıt altyapı projelerine kaynak aktarırken, elektrikli ulaşım sistemlerine yapılacak büyük çaplı harcamaları erteleyebilir (Healy & Barry, 2017, s. 456). Bu eğilimin ardında, fosil

yakıt endüstrisiyle uzun soluklu iş ilişkileri ve vergi gelirleri elde eden hükümetlerin tutumu da vardır. Yüksek vergilendirme oranlarına sahip akaryakıt satışları, birçok ülkenin bütçesinde önemli bir pay yaratır; elektrikli araçlar için geçerli olacak farklı vergi sistemlerinin henüz netleşmemesi, idari organların geleneksel sektörle iş birliği yapmaya devam etmesinin nedenlerinden biridir (Transport & Environment, 2022, s. 9). Ayrıca, fosil yakıt altyapısına yatırımın sürdürülmesi, elektrikli araçların maliyet avantajını sınırlayabilir. Yaygın akaryakıt istasyonları, kısa yakıt doldurma süreleri ve tanıdık kullanım pratikleri, tüketiciler için elektrikli araçlara geçişteki algısal engelleri büyütebilir. Menzil kaygısı, şarj süresi uzunluğu, şarj istasyonlarının azlığı gibi sorunlar gündemde kalmaya devam eder (IEA, 2022, s. 27). Bu nedenle, kamu desteği veya özel sektör girişimleriyle şarj altyapısına yeterli kaynak sağlanmadıkça, mevcut fosil yakıt ağı güçlü bir alternatif olmaya devam edecek ve elektrikli araçlar, potansiyel kullanıcılar tarafından “yeterince hazır olmayan bir teknoloji” şeklinde algılanacaktır (Toksöz, 2020, s. 61).

Fosil yakıt lobilerinin ve geleneksel otomotiv sektörünün elektrikli araç dönüşümüne karşı kullandığı en etkili enstrümanlardan biri de regülasyon ve yasa yapım süreçlerine doğrudan veya dolaylı etki etmektir (Healy & Barry, 2017, s. 457). Enerji, ulaşım ve çevre politikalarının hazırlanmasında, yasaların meclisten geçmesi sırasında veya yönetmeliklerin düzenlenmesi aşamalarında bu lobiler, bürokratlara, siyasetçilere ve danışmanlara yönelik yoğun lobi faaliyeti yürütebilir. Emisyon standartlarının gevşetilmesi, karbon vergisi oranlarının ertelenmesi veya elektrikli araçlara yönelik teşviklerin kısılması, bu lobi faaliyetinin sonuçlarından bazılarıdır (Transport & Environment, 2022, s. 11). Aynı şekilde, araç güvenliği ve test prosedürlerindeki standartların belirlenmesinde de fosil yakıt merkezli otomotiv şirketleri, geçmişten gelen teknik uzmanlığını koz olarak kullanarak yasal düzenlemelerin lehlerine şekillenmesini isteyebilir (IEA, 2022, s. 30). Bu süreçte, kamuoyunu ve medya organlarını etkileme stratejileri de devreye girer. Örneğin, elektrikli araçların batarya yangın riski veya menzil kısıtları gibi konular abartılarak sunulabilir; “fiyat farkı çok yüksek, tüketici talebi yok” gibi argümanlar gündeme getirilerek elektrikli araçlara dönük teşviklerin gereksiz olduğu iddia edilebilir (Healy & Barry, 2017, s. 459). Aynı şekilde, yerel otomotiv endüstrisinin rekabet gücünü korumak adına hükümetlerin, katı emisyon standartlarının yürürlüğe girme tarihini ertelemesi veya sınırlı bir pilot bölge uygulamasıyla yetinmesi gibi kararlar da alınabilir. Bu, bir yandan ulusal ekonomiye kısa vadede katkı sağlayan geleneksel

otomotiv sektörü ve onun ekosistemini korur; öte yandan elektrikli araç pazarının büyümesini frenler (Toksöz, 2020, s. 64). Diğer yandan, regülasyon ve yasa yapım süreçlerine bu etki, sadece ulusal ölçekle sınırlı değildir; uluslararası müzakereler ve ticaret anlaşmaları da lobilerin müdahale alanına girer. Petrol ve gaz şirketleriyle güçlü ilişkileri bulunan bazı ülkeler, küresel iklim anlaşmalarında katı taahhütlerden kaçınabilir veya otomotiv ihracatı yapan ülkeler, elektrikli araçlar lehine yapılacak agresif düzenlemeleri yumuşatmayı tercih edebilir (Transport & Environment, 2022, s. 14). Elektrikli araçların teşvik edilmesiyle ilgili kararlar, Dünya Ticaret Örgütü (DTÖ) veya ikili ticaret anlaşmaları çerçevesinde tartışılabilir. Sonuç olarak, fosil yakıt lobilerinin ve geleneksel otomotiv sektörünün regülasyon ve yasa yapım süreçlerinde yoğun etkisi, elektrikli araçlar açısından ciddi bir tehdit yaratır. Bu etki, sektörde “geçiş dönemini” uzatmakta, inovasyon hızını düşürmekte ve emisyon azaltım hedeflerine ulaşmayı güçleştirmektedir (IEA, 2022, s. 33).

3.4.4. Enerji Üretiminde Fosil Kaynakların Hâlâ Yüksek Payı

Elektrikli araçlar (EA), egzoz emisyonlarını sıfıra indiren yapıları sayesinde, içten yanmalı motorlu araçlara (IYMA) kıyasla iklim değişikliği ve hava kirliliğiyle mücadelede önemli bir fırsat olarak kabul edilmektedir. Ne var ki bu avantaj, elektrik üretiminin karbon yoğunluğuna doğrudan bağlıdır (IEA, 2022, s. 15). Özellikle kömür, petrol veya doğal gaz gibi fosil yakıtların hâlâ büyük paya sahip olduğu elektrik şebekelerinde üretilen enerjiyi kullanan elektrikli araçların “gerçek” emisyon azaltım potansiyeli, teoride beklenenden düşük kalabilmektedir. Örneğin, kömürün hâkim olduğu bir enerji sisteminde, elektrikli bir otomobilin tam yaşam döngüsünü incelediğimizde (well-to-wheel analizi), benzinli veya dizel araçlara kıyasla net kazancın yeterince yüksek olmadığı yönünde çalışmalar mevcuttur (Özer, 2021, s. 126030). Bu durum, elektrikli araçlara “sıfır emisyonlu teknoloji” gözüyle bakanların, üretimden tüketime kadar tüm aşamaları hesaba katan bir bakış açısına yönelmelerine neden olmaktadır. Batarya üretimindeki enerji tüketimi ve ham madde süreçleri bir kenara bırakılacak olsa bile, şebekeye bağlandığı anda kullanılan elektriğin kaynağı, EA’nın çevresel etkisini belirleyen esas unsurdur (Sovacool, 2021, s. 101916). Örneğin, Batı Avrupa’nın bazı ülkelerinde yenilenebilir enerjinin şebekede önemli bir paya ulaşması sayesinde elektrikli araçlar kayda değer bir avantaj sunarken, fosil yakıt ağırlıklı bölgelerde bu yarar “sınırlı bir azalma” olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla, dünyada hâlâ yoğunlukla kullanılan kömür santralleri, doğal gaz çevirim santralleri

veya petrol ürünleriyle çalışan tesisler devrede olduğu sürece, elektrikli araçların “emisyona avantajı” sorgulanmaya devam edecektir (Healy & Barry, 2017, s. 452). Bu sorgu aynı zamanda kamuoyunda elektrikli araçların itibarı üzerinde de etkilidir. Çevre dostu bir imaja sahip olduğu düşünülen elektrikli araçlar, fosil kaynaklara dayalı elektrik üretiminin egemen olduğu bölgelerde “yeşil olma” iddiasını kısmen yitirir. Hatta kimi eleştiriler, elektriğin karbon yoğun bir şebekeden gelmesi hâlinde bir dizel aracın toplam emisyonuna yakın değerler oluştuğunu savunur (IEA, 2022, s. 17). Elbette, tüm araştırmalar bu kadar olumsuz değildir; kömürün payı daha düşük, doğalgazın ağırlık kazandığı veya yenilenebilir katkının arttığı sistemlerde EA’ların getirisi daha somut hâle gelir (Özer, 2021, s. 126030). Ancak genele baktığımızda, fosil yakıtların hâlâ yüksek olduğu bölgelerde bu tablo net bir “tehdit” unsuruna dönüşür: Yüksek fosil payı sürerken elektrikli araçların emisyon avantajından tam manasıyla yararlanmak güçleşir.

Elektrikli araçların fosil yakıt yoğun enerji üretim sistemlerinden kaynaklanan bir diğer tehdidi, ekonomik boyutta kendini gösterir. Günümüzde kömür ve doğalgazın hâkim olduğu piyasalarda elektrik üretimi sıklıkla karbon emisyonlarına göre vergilendirilir veya emisyon ticareti sistemine tâbidir. Bu tür düzenlemelerde enerji üreticileri karbon maliyetlerini elektrik fiyatlarına yansıtır ve sonuçta elektrikli araç kullanıcıları, şarj maliyetleri bakımından beklenenden daha yüksek faturalarla karşılaşabilir (Healy & Barry, 2017, s. 456). Özellikle gelişmekte olan ülkelerde fosil kaynaklarla çalışan elektrik santralleri için sübvansiyonlar devam ediyorsa, elektrik üreticilerinin yenilenebilir kaynaklara geçmesi teşvik edilmeyebilir ve elektrik fiyatları dengesiz seyreder (Sovacool, 2021, s. 101916). Karbon yoğun bir piyasada, elektrik üretimi ve tüketimini düzenleyen politikalar da elektrikli araçların maliyet avantajını zayıflatır. Şebeke altyapısının modernizasyonu, dağıtım hatlarının güçlendirilmesi ve akıllı şebeke uygulamalarının entegrasyonu gibi adımlar atılmadıkça, hızlı şarj istasyonlarının sayısının artmasıyla talep dalgalanmaları yaşanabilir (IEA, 2022, s. 19). Bu dalgalanmalar, fosil yakıt santrallerinin regülasyon maliyetini ve rekabet gücünü etkilediği gibi, şebekedeki elektrik fiyatlarını yükseltebilir. Dolayısıyla, elektrikli araçların “işletme maliyeti düşük” argümanı, yüksek karbon maliyetleriyle yüklenmiş bir piyasada gerçeklikte eriyebilir. Hatta, fosil yakıtların fiyatı sübvansiyonlarla düşük tutulurken, elektrik üretiminde yenilenebilir pay yetersiz kalıyorsa, EA kullanıcıları için yakıt maliyeti bakımından IYMA sahiplerine kıyasla bariz bir avantaj kalmayabilir (Toksöz, 2020, s. 42). Ekonomik

zorluk, üreticilerin de yatırım kararlarını etkiler. Elektrikli araç pazarının gelişmesi için gerekli altyapı (örneğin hızlı şarj istasyonları) planlanırken, yatırımcılar belirsiz veya dalgalı elektrik fiyatları yüzünden geri adım atabilirler (IEA, 2022, s. 21). Aynı şekilde, tüketici tarafında da araç satın alımında hedeflenen uzun vadeli tasarrufla gerçek hayatta karşılaşmama durumu ortaya çıkabilir. Yüksek elektrik fiyatları veya zamlı tarifeler, potansiyel alıcıların kararlarını ertelemesine neden olur (Sovacool, 2021, s. 101916). Böylece fosil yakıtların payı düşmeden, elektrikli araçların geniş kitlelere ulaşması gecikir ve sektörün büyümesi “beklenmedik bir ekonomik tehdit” hâline dönüşür (Toksöz, 2020, s. 44).

Elektrikli araçların fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminden etkileniş biçimi, her coğrafyada farklılık göstermektedir. Norveç veya Uruguay gibi büyük ölçüde hidroelektrik ve yenilenebilir kaynaklarla elektriğini sağlayan ülkelerde, elektrikli araçlar gerçek anlamda düşük veya sıfıra yakın karbon emisyonlu bir seçenek sunar (IEA, 2022, s. 24). Buna karşın, Çin veya Hindistan gibi kömüre hâlâ büyük oranda bağımlı olan ülkelerde, EA kullanımının yol açtığı dolaylı emisyonlar ciddi oranda yükselebilir (Sovacool, 2021, s. 101916). Dolayısıyla, “elektrikli araçlar küresel ölçekte çevre dostudur” genellemesi, yerel elektrik üretim karışımını dikkate almadığımız sürece eksik ve hatta yanıltıcı olabilir. Bu farklılıklar, sadece ülkelerin coğrafi veya ekonomik koşullarına değil, politik tercihlerine ve yatırım stratejilerine de dayanır. Bazı devletler, yoğun şekilde kömür santrallerine yatırım yapmayı sürdürürken, diğerleri yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırarak elektrikli araçlarla elde edilen emisyon avantajını pekiştirir (Özer, 2021, s. 126030). Uzun vadede, elektrikli araçların yaşamsal faydaları, yenilenebilir enerji sistemleriyle senkronize edildiklerinde açığa çıkar. Bununla birlikte, fosil yakıt kullanımını azaltamayan veya nükleer gibi düşük karbonlu seçeneklere yönelmeyen ülkeler, elektrikli araçların potansiyelini tamamen kullanmada zorlanır (Healy & Barry, 2017, s. 458). Ayrıca, bu çeşitlilik, uluslararası enerji ve iklim politikalarında tartışma konusu olur. Emisyon ticareti ve karbon sınır vergisi gibi mekanizmalar, elektrik üretimindeki karbon yoğunluğu farklılıklarını hesaba katmaya çalışır (Toksöz, 2020, s. 46). Örneğin, büyük otomobil üreticileri, “ürünlerinin kullanım ömrü emisyonu” açısından yenilenebilir enerjiyle entegre ülkelerde avantaj sağlarken, kömür veya doğal gaz ağırlıklı üretim karışımının olduğu pazarlara yönelik stratejilerinde zorluk yaşarlar (IEA, 2022, s. 26). Dolayısıyla, dünya genelinde süregelen fosil yakıt payı, elektrikli araçlar için bir tehdit oluşturur: Yüksek karbonlu elektriğin varlığı, çevre dostu algısını zedeler ve ekonomik

açından sürdürülebilir bir büyüme ortamını sektöre uğrattır (Sovacool, 2021, s. 101916). Sonuç olarak, elektrikli araçlar iklim hedefleri için temel bir çözüm olarak ortaya çıksa da enerji sektörünün düşük karbonlu kaynaklara dönüşü geciktiği sürece, onların gerçek potansiyeli sınırlı kalacak ve bu durum, sektöre yönelik bir “tehdit unsuru” şeklinde kendini göstermeye devam edecektir (Toksöz, 2020, s. 48).

3.4.5. Teknolojik Değişimin Belirsizliği ve Pazar Adaptasyonu

Elektrikli araçlar (EA), iklim değişikliği ve enerji güvenliği gibi konularda umut vadeden bir çözüm olarak son on yılda hızla yaygınlaşırken, aynı zamanda teknolojik geleceği belirsiz bir sektörü de temsil etmektedir (IEA, 2022, s. 18). Zira elektrikli mobilité, her ne kadar günümüzün baskın alternatif yakıt teknolojisi olsa da, hidrojen yakıt hücreleri (FCEV), e-yakıtlar (sentetik yakıtlar) veya biyoyakıtlar gibi farklı ve potansiyel olarak rekabetçi teknoloji çözümleri de gelişim sürecindedir (Heidrich et al., 2017, s. 20). Bu durum, elektrikli araç ekosisteminde “teknolojik değişimin belirsizliği” şeklinde tanımlanabilecek bir tehdit ortaya çıkarır. Şöyle ki, mevcut pazarın önemli bir kısmı lityum-iyon bataryalara odaklanmışken, yakın gelecekte daha yüksek enerji yoğunluğu sunan katı hâl (solid-state) piller veya yakıt hücresi sistemleri ana akım hâline gelebilir. Bu çeşitlilik hem otomotiv üreticileri hem de yatırımcılar için planlamada zorluk yaratmaktadır. Katı hâl pillerin veya hidrojen altyapısının hızlı ilerlemesi durumunda, şarj istasyonu ağlarına ve batarya tedarik zincirlerine yapılan mevcut büyük yatırımların “erken demode” riskiyle karşılaşması mümkündür (Lu et al., 2020, s. 5). Öte yandan, sentetik yakıtlar (e-fuels) gibi çözümlerin, mevcut içten yanmalı motor teknolojilerini kısmen uyarlayarak yoluna devam edebilmesi, elektrikli ulaşımın payını öngörülenden daha düşük seviyede tutabilir. Tüm bunlar, otomotiv sektöründe stratejik belirsizliklere ve gelecek öngörüsünü zorlaştıran senaryolara neden olmaktadır (IEA, 2022, s. 20). Ayrıca, kamu politikalarının da hangi teknolojiye öncelik tanıyacağına dair net bir çizgi belirlememesi, kısa vadede kafa karışıklığını derinleştirmektedir (Heidrich et al., 2017, s. 22). Yeni yakıt teknolojilerinin ortaya çıkması, elektrikli araçlar açısından “teknolojik değişim” riskini katmerlendirir. Üreticiler, lityum-iyon batarya tedarik zincirini optimize etmekle meşgulken, hidrojen yakıt hücreli prototiplerin yüksek performans göstermesi veya sentetik yakıt endüstrisinin hızla maliyetleri düşürmesi, pazarın yönünü aniden değiştirebilir (Lu et al., 2020, s. 8). Böylesi bir senaryoda elektrikli araç pazarına büyük yatırımlar yapan şirketler, kısa süre içinde rekabet

avantajlarını yitirme veya ciddi finansal kayıp yaşama riskine maruz kalabilir. Sonuç olarak, elektrikli araçların öngörülemeyen teknoloji geleceği, uzun vadeli yatırım planlarının ertelenmesine ya da yavaşlamasına yol açan bir tehdit unsuru olarak belirir (Toksöz, 2020, s. 53).

Teknolojik değişimin belirsizliği, yalnızca endüstriyel düzeyde değil, tüketici davranışları ve pazar adaptasyonunda da etkisini gösterir. Elektrikli araçların yaygınlaşabilmesi için, menzil, şarj süresi ve toplam sahip olma maliyeti konularındaki soru işaretlerinin giderilmesi gerekirken; yeni yakıt teknolojilerinin de devreye girmesi, tüketicilerin karar alma süreçlerini karmaşıktırabilir (IEA, 2022, s. 23). Örneğin, hidrojen yakıt hücreli araçlar gelişmiş altyapıya ulaştığında daha hızlı yakıt dolumu avantajı sunabilir; sentetik yakıtlar mevcut içten yanmalı motor altyapısını kullanarak piyasada yer edinmeyi hedefleyebilir. Tüketiciler, elektrikli araç satın almak veya beklemek arasında tercih yaparken, “yakın gelecekte daha pratik bir seçenek çıkacak mı?” sorusunu sormaya başlar (Heidrich et al., 2017, s. 24). Bu durum, “bekle-gör” eğilimini güçlendirerek elektrikli araç pazarının büyüme hızını yavaşlatabilir. Tüketici taleplerindeki belirsizliğin bir diğer boyutu da menzil ve şarj altyapısıyla ilgilidir. Bir kısım sürücü, elektrikli araçların güncel kapasitesini günlük kullanım için yeterli görüp satın almaya yönelirken, daha büyük bir kesim uzun yol seyahatlerinde hızlı yakıt ikmali avantajını koruyan hidrojen veya sentetik yakıtlara dair umut besleyebilir (Sovacool, 2021, s. 101916). Aynı şekilde, şehir içi mikromobilité çözümlerinin (elektrikli bisiklet, scooter vb.) çoğalması, konvansiyonel otomobil sahipliğini sorgulatabilir ve elektrikli otomobillerin pazar payını başka bir açıdan kısıtlayabilir. Kimi kullanıcılar, yapay zekâ destekli otonom ulaşım teknolojileriyle entegre araç paylaşım sistemlerini beklerken, elektrikli araç satın alma kararını erteleyebilir (Lu et al., 2020, s. 10). Bu belirsizlik, aynı zamanda üreticilerin pazarlama stratejilerinde ve model portföyünde de dalgalanmalara neden olur. Hangi segmentin veya teknolojinin orta vadede galip geleceği konusundaki öngörü zayıf kaldığı sürece, şirketler seri üretim aşamasına geçmekte temkinli davranarak risk almayabilir (Toksöz, 2020, s. 56). Bu da ölçek ekonomilerinin gecikmesine yol açarak, elektrikli araçların maliyet avantajına ve tüketiciye yansıyan fiyatlara olumsuz yansır (IEA, 2022, s. 25). Dolayısıyla, tüketici talebindeki belirsizlik, pazar adaptasyonunu yavaşlatan, teknolojik sıçramaları engelleyen ve sektörde uzun vadeli güveni sarsan bir tehdit hâline gelmektedir (Heidrich et al., 2017, s. 26).

Teknolojik değişimin belirsizliği ve pazar adaptasyonundaki dalgalanmalar, elektrikli araçlara yönelik araştırma-geliştirme (AR-GE) yatırımlarını da etkilemektedir. Sektördeki büyük otomotiv şirketleri, batarya teknolojilerinde ilerleme sağlamaya çalışırken bir yandan hidrojen yakıt hücresi veya hibrit modeller gibi alternatiflere de kaynak ayırmak isteyebilir. Bu “çok yönlü” strateji, firmaların tek bir teknolojiye yüksek miktarda yatırım yapma motivasyonunu zayıflatarak AR-GE harcamalarını bölünmüş hâle getirebilir (Toksöz, 2020, s. 58). Sonuçta, hiçbir alanda tam derinlemesine ilerleme kaydedilemeden, teknoloji yol haritaları belirsizliğini korur ve sektörde “geçiş döneminin” uzamasına neden olur (IEA, 2022, s. 28). Ayrıca, batarya maliyetlerini düşürme çabaları ve şarj altyapısı projeleri gibi kritik yatırımlar, beklenen hızda sonuç vermeyebilir. Özellikle ekonomik kriz, jeopolitik belirsizlik veya enerji fiyatlarındaki dalgalanmalar döneminde şirketler, geri dönüşü daha öngörülebilir alanlara yönelmeyi tercih edebilir (Heidrich et al., 2017, s. 27). Mesela, katı hâl pillerde devrimsel sayılabilecek prototipler geliştirmek yerine, kobalt içeriğini azaltan standart lityum-iyon varyantlarına sınırlı AR-GE bütçesi ayrılabilir. Bu yaklaşım, elektrikli araçların menzil, şarj süresi ve maliyet gibi temel sorunlarına radikal çözümler bulma hızını yavaşlatır (Sovacool, 2021, s. 101916). Aynı şekilde, yenilikçi iş modelleri (örneğin batarya değiştirme istasyonları) veya yazılım tabanlı araç paylaşım platformları için gereken AR-GE de “piyasa belirsizliği” sebebiyle ertelenebilir. Bunun yanı sıra, yeni yakıt teknolojilerinin potansiyel yükseliş i (hidrojen, e-yakıtlar, vb.) otomotiv ve enerji şirketlerinin yatırım kararlarını da çeşitlendirir. Bazı firmalar, hidrojen altyapısına büyük bütçe ayırma yoluna giderken, lityum-iyon batarya AR-GE'si arka plana itilebilir (Lu et al., 2020, s. 12). Bu “AR-GE göçü” veya “yatırım kayması”, elektrikli araç ekosisteminde uzun zamandır beklenen ölçek ekonomisine ulaşmayı zorlaştırabilir ve sektörün olgunlaşmasını geciktirebilir (IEA, 2022, s. 30). Neticede, teknolojik değişimin belirsizliği ve pazarın nereye evrileceğine dair net bir konsensüs olmayışı, elektrikli araçlar için risk teşkil eden unsurlardan biridir. Bu belirsizlik, AR-GE yatırımlarının yönünü bulanıklaştırırken, sektörün rekabetçi ve sürdürülebilir yapıya erişmesini güçleştirir (Toksöz, 2020, s. 60).

SONUÇ

Bu tez, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma arasındaki etkileşimi bütüncül bir yaklaşımla ele alarak, enerji sektöründe yaşanan dönüşüm sürecinin mevcut koşullarını ve geleceğe dönük potansiyelini kapsamlı biçimde incelemiştir. Geleneksel olarak fosil yakıtların egemen olduğu enerji sisteminin, iklim değişikliği ve çevre kirliliği gibi akut sorunlara yol açarak sürdürülemez bir yapı oluşturduğu günümüzde, yenilenebilir enerjiye dayalı çözümlerin giderek daha belirgin bir gereklilik haline geldiği görülmektedir. Sürdürülebilir kalkınma yaklaşımı, ekonomik büyüme, toplumsal refah ve ekolojik denge arasındaki hassas etkileşimi gözetmek suretiyle gelecekteki kuşakların haklarının korunmasına ve bugünün gereksinimlerinin sağlıklı biçimde karşılanmasına odaklanmaktadır. Tez çalışması da bu çerçevede, yenilenebilir enerji politikalarının ekonomik, toplumsal ve çevresel yönlerini bir araya getirmiş; ayrıca elektrikli araçlar gibi somut örneklerin bu dinamik içindeki rolünü analiz ederek stratejik bir değerlendirme sunmuştur.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının (örneğin güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle) kullanımının artması, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleştirilmesinde vazgeçilmez bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Bu kaynakların kullanımında her ülkenin coğrafi özellikleri, ekonomik kapasiteleri, teknik altyapıları ve politik koşulları belirleyici rol oynamakla birlikte, genel eğilimin küresel ölçekte yenilenebilir enerji kapasitelerini artırmaya yönelik olduğu tespit edilmiştir. Ekonomik büyüme ve istihdam yaratma, yerel üretim kapasitesinin güçlenmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi çok yönlü yararlar sunması nedeniyle yenilenebilir enerji teknolojileri, günümüzde kalkınma stratejilerinin temel dayanaklarından biri haline gelmektedir. Bununla birlikte, teknolojik kısıtlar, yüksek yatırım maliyetleri, düzenleyici mevzuat eksiklikleri ve toplumsal farkındalık düzeyindeki yetersizlikler gibi faktörlerin, yenilenebilir enerji projelerinin yaygınlaşmasında engelleyici rol oynadığı da sıkça gözlemlenmektedir.

Tezde uygulanan SWOT analizi, özellikle elektrikli araçlar üzerinden hem yenilenebilir enerji politikalarının somut çıktılarını hem de sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle nasıl bir bütün oluşturabileceklerini gözler önüne sermiştir. Analizin “güçlü yönler” boyutu, elektrikli araçların düşük karbon salınımına sahip olmaları, uzun vadede enerji ve işletme maliyetlerini düşürmeleri ve hızlı inovasyon imkânı sunmaları gibi avantajları vurgulamıştır. Bu avantajlar, kent içi hava kalitesinin

iyileştirilmesi ve gürültü kirliliğinin azaltılması gibi toplumsal refaha yönelik unsurları da beraberinde getirmektedir. Üstelik batarya teknolojilerinin gelişmesi ve yeni nesil şarj altyapılarının yaygınlaşması sayesinde, elektrikli araçların gelecekte çok daha geniş bir kullanıcı tabanına ulaşması beklenmektedir. Ancak “zayıf yönler” kategorisinde ortaya çıkan yüksek ilk yatırım maliyeti, batarya geri dönüşümü ile ilgili sorunlar ve menzil kaygısı gibi başlıklar, elektrikli araçların yaygınlaşmasını sınırlayan temel etkenler olarak öne çıkmaktadır. Özellikle kırsal bölgelerde veya şehir merkezleri dışında şarj istasyonu kurulumunun yeterince hızlı ilerlememesi, tüketici nezdinde çekinceler yaratabilmektedir. Ayrıca batarya teknolojisinin henüz tam olarak olgunlaşmamış olması, üretim maliyetlerini artırabildiği gibi uzun şarj süreleriyle günlük ulaşım rutinlerini de etkileyebilmektedir.

Analizin “fırsatlar” boyutu, uluslararası standartların gelişmesi, politik teşvik ve düzenleyici desteklerin yaygınlaşması, yeni iş modellerinin oluşması ve hızla düşen batarya maliyetleri gibi konulara işaret etmektedir. Yenilenebilir enerjiyle entegre edilen elektrikli araç altyapıları, fosil kaynaklı emisyonların azalmasına katkı sağlamakta ve ülkelerin enerji bağımlılığını azaltıcı yönde etkiler getirmektedir. Bu yönde atılacak planlı adımlar, yenilenebilir enerji sektörünün genişlemesini hızlandırarak sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir ekosistem oluşturabilir. Bununla birlikte, analizde “tehditler” kategorisinde değerlendirilen ham madde temelli riskler, fosil yakıt lobilerinin politik baskısı ve enerji üretiminde hâlen fosil yakıtların büyük paya sahip olması gibi unsurlar, elektrikli araç sektörünün küresel ölçekte ivme kaybetmesine veya beklenen hızda ilerleyememesine neden olabilmektedir. Bu tehditler, küresel tedarik zincirlerini ve fiyat istikrarını doğrudan etkilemekte; batarya üretimi için gerekli olan lityum, kobalt gibi ham maddelerin ihracatçı ülkelerdeki politik dalgalanmalardan veya arz-talep dengesizliklerinden ciddi şekilde etkilenebilmektedir.

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, yenilenebilir enerji ile sürdürülebilir kalkınma arasındaki bütünleşik yapının ulusal ve uluslararası düzeyde daha fazla desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle politika yapıcıların, elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji projeleri için uzun vadeli ve istikrarlı bir çerçeve sunacak yasal düzenlemeler hazırlaması büyük önem taşımaktadır. Yatırım teşviklerinden vergi düzenlemelerine, altyapı projeleri için sağlanacak finansman modellerinden kamuoyu farkındalık kampanyalarına kadar çok çeşitli araçların devreye sokulması gerekmektedir. Böylesi kapsamlı bir yaklaşım, ekonomik dinamizm ve toplumsal

Fayda adına dikkate değer sonuçlar verebileceği gibi, iklim değişikliğiyle mücadelede de etkili bir çözüm sunabilir.

Tezin ortaya koyduğu bulgulardan, gelecekte yapılacak çalışmalara yönelik bazı öneriler de geliştirilebilir. Öncelikle, elektrikli araç teknolojilerinin bölgesel ve sektörel bazdaki etkilerini daha derinlemesine analiz etmek üzere, kapsamlı ve güncel veri setlerine ihtiyaç duyulduğu düşünülmektedir. Otomotiv, lojistik, enerji depolama, akıllı şebekeler ve yazılım geliştirme gibi birbirine bağlı sektörlerin etkileşimini derinlemesine irdelemek, yenilikçi iş modelleri geliştirilmesine öncülük edecektir. Bunun yanı sıra, farklı coğrafyalarda ve farklı gelir gruplarındaki tüketicilerin elektrikli araçlara yaklaşımını inceleyen sosyoekonomik araştırmaların, sektörün çok yönlü dinamiklerini anlamada önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir. Bu tür çalışmalar, altyapı yatırımlarının konumlandırılması, pazar segmentasyonunun belirlenmesi ve toplumsal farkındalık oluşturulması gibi konularda yol gösterici olacaktır. Ayrıca yerel ve bölgesel düzeyde geliştirilecek politikalar, merkezi hükümetlerin stratejilerini tamamlayarak enerji ve ulaşım alanında daha esnek ve hedefe yönelik uygulamaların önünü açabilir.

Ekonomik ve sosyal etki analizleri de bu kapsamda daha detaylı olarak ele alınmalıdır. Elektrikli araç teknolojilerinin üretimden geri dönüşüme kadar uzanan tüm sürecinin nasıl bir katma değer yarattığı ve istihdama nasıl yansıdığı; aynı zamanda sosyal eşitlik, erişilebilirlik ve kentsel planlama konularında ne tür sonuçlar doğurduğu, çok boyutlu araştırma modelleriyle incelenmelidir. Bu incelemeler, iklim politikaları, karbon piyasaları ve yeşil ekonomiye geçiş gibi makro düzeyde etkilere de rehberlik edebilir. Yine uluslararası standardizasyon ve işbirliği mekanizmaları, elektrikli araç teknolojilerinin ve yenilenebilir enerji projelerinin uyumlu biçimde yaygınlaşmasını kolaylaştırmak açısından kritik önemdedir. Farklı ülkelerin farklı regülasyonlara sahip olması, küresel tedarik ağlarında birden çok teknik standart ve sertifikasyon sürecine yol açabilmekte, bu da maliyetleri ve bürokratik engelleri artırabilmektedir. Dolayısıyla uluslararası düzeyde ortak normların ve standartların geliştirilmesi, hem özel sektörün rekabet kapasitesini güçlendirecek hem de tüketicilerin bu teknolojilere geçişini kolaylaştıracaktır.

Bu genel çerçevede bakıldığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve sürdürülebilir kalkınma yaklaşımının benimsenmesi, enerji piyasalarının geleceğinde vazgeçilmez bir yer tutmaktadır. Elektrikli araçlar örneği de bu dönüşümün ulaşım boyutunda somut bir yansıması olup, geleceğin enerji-ekonomi modeli açısından

önemli ipuçları vermektedir. Tez çalışması boyunca incelenen kuramsal yaklaşımlar, veri analizleri ve SWOT değerlendirmesi, elektrikli araç sektörünün kısa ve orta vadede hızla büyüme potansiyeline sahip olduğunu, ancak bunun eşzamanlı olarak altyapı, mevzuat, toplumsal farkındalık ve teknolojik gelişmelerle desteklenmesi gerektiğini göstermektedir. Bu kapsamda, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin başarıya ulaşması için enerji sistemlerinin yenilenebilir kaynaklara adaptasyonunun artırılması, temiz üretim ve tüketim modellerinin teşvik edilmesi, yeşil teknoloji AR-GE faaliyetlerinin hızlandırılması ve çevresel hassasiyetlerin toplumsal düzeyde içselleştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Diğer yandan, elektrikli araçların özellikle yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre bir sistem sayesinde hayatımıza adapte edilmesi bizi sürdürülebilir kalkınma hedeflerine bir nebze daha yaklaştırmaktadır. Bunun sağlanması için, özellikle devlet teşvikleri büyük önem arz etmektedir. Elektrikli araçlardaki ilk yatırım maliyetlerindeki dezavantaj devletin sağlayacağı teşvikler ve sübvansiyonlar ile destekleneceği düşünülmektedir. Devlet, desteğini ilk satın almadaki desteklemeler ile gösterebileceği gibi, şarj altyapısı ve meskenlere sağlayacağı kurulum kolaylıkları ile de sağlayabilir. Özellikle elektrikli araçların fosil yakıtlı araçlara göre daha uzun enerji ikmal süreleri sunmalarından dolayı sayıca fazla şarj istasyonlarına ihtiyaç duymaktadır. Burada devlet desteği ile daha hızlı ve sayıca fazla şarj istasyonu kurulumu ile hem şarj altyapısı desteklenir hem de uzun sürüşlerdeki menzil kaygısının önüne geçilerek elektrikli araçlara yönelik kaygıların bir nebze önüne geçilmiş olur. Ayrıca, meskenlere kurulacak şarj istasyonları ve hatta yenilenebilir enerji kaynakları noktasında sağlanacak bir kolaylık bizi hem elektrikli araçlara hem de sürdürülebilir kalkınmaya bir adım daha yaklaştıracaktır. Özellikle kendi kendine yetebilir projelerin desteklenmesi ve teşvik edilmesi ile aynı zamanda enerji anlamında bir bağımlılığın da önüne geçilmesinin yolu açılabilir.

Sonuç olarak, bu tez yenilenebilir enerji ile sürdürülebilir kalkınma arasındaki çok boyutlu ilişkiyi geniş bir perspektiften ele almış ve elektrikli araçlar konusunu derinlemesine inceleyerek belirli bir alt sektöre dair stratejik bir çerçeve sunmuştur. Yapılan çalışmalar, teknolojik dönüşüm ve çevresel kaygıların kesişiminde yer alan elektrikli araçların, sürdürülebilir kalkınma hedefine ulaşmada önemli bir kaldıraç işlevi gördüğünü ortaya çıkarmıştır. Buna ek olarak, enerji politikalarına dair alınacak kararların, akademik araştırmalarla desteklenen kanıt temelli yaklaşımlarla şekillendirilmesinin büyük fayda sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda,

yenilenebilir enerji kullanımının artırılması ve sürdürülebilir kalkınma anlayışının yerleştirilmesi için disiplinlerarası işbirliği ve uluslararası koordinasyonun güçlendirilmesi, gelecekteki çalışmaların daha etkin sonuçlar elde etmesine katkı sunacaktır. Böylelikle insanlığın ortak geleceğini ilgilendiren iklim değişikliği, doğal kaynakların sürdürülebilirliği ve kapsayıcı ekonomik büyüme gibi temel meselelerde daha kalıcı ve etkili çözümlere ulaşmak mümkün olacaktır.



KAYNAKÇA

- Abdülvahitoğlu, A., Abdülvahitoğlu, A. (2023). Hibrit Elektrikli Araçlar, Fişe Takılabilir Hibrit Elektrikli Araçlar ve Tamamen Elektrikli Araçların Swot Analizi ile Karşılaştırılması. *International Science and Art Research*. 227-243
- Acar, S., & Yıldız, Ö. (2016). Renewable energy, energy efficiency and sustainability: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 110-122.
- ACEA (European Automobile Manufacturers' Association). (2022). Making the transition to zero-emission mobility: Progress and opportunities, 1-25.
- Aitken, M. (2010). Why we still don't understand the social aspects of wind power: A critique of key assumptions within the literature. *Energy Policy*, 38(4), 1834-1841.
- Akdoğan, Dilek A. (2018). Yenilenebilir enerjide kamu politikaları ve Türkiye. Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayınlanmamış Doktora Tezi, İstanbul.
- Aksoy, N. (2018). Jeotermal enerjinin sürdürülebilir kalkınmaya etkileri. *Jeotermal Enerji Dergisi*, 12(1), 45-58.
- Anderson, C. D., & Anderson, J. (2010). *Electric and Hybrid Cars: A History*. McFarland, 50-95.
- Ansoff, H. I. (1965). *Corporate Strategy*. McGraw-Hill, 45-75.
- Ari, Y. O. (2020). Küresel Elektrikli Otomobil Piyasasına Genel Bakış. *Kırklareli Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 4(2), 193-203. <https://doi.org/10.47140/kusbder.714905>
- B. Kuzu, M. Nurmhammed, O. Akdağ, ve T. Karadağ, "V2G Uygulamalarında Elektrikli Araçların Dağıtım Şebekesine Optimum Entegrasyonunun Analizi İçin Newton Raphson Temelli Yeni Bir Model", *DÜMF MD*, c. 15, sy. 2, ss. 375–385, 2024, doi: 10.24012/dumf.1441551.
- Balcı, A. (2023). Enerji Güvenliğinde Türkiye'nin Rolü ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları. *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (44), 200-233.

Barney, J. (1991). Firm Resources and Sustained Competitive Advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99–120.

Barney, J. B., & Clark, D. N. (2007). *Resource-Based Theory: Creating and Sustaining Competitive Advantage*. Oxford University Press.

Barney, J. B., & Hesterly, W. S. (2019). *Strategic Management and Competitive Advantage* (6th ed.). Pearson.

Batmaz, Ü. (2023). Elektrikli Araçlarda Batarya Teknolojileri. *TMMOB Makine Mühendisleri Odası*, 25-34.

Bayraç, H. N., (2009), “Küresel Enerji Politikaları ve Türkiye: Petrol ve Doğalgaz Kaynakları Açısından Bir Karşılaştırma”, *ESOGÜ Sosyal Bilimler Dergisi*, 10 (1), 115-142.

Bayrak, M. ve Esen, Ö. (2014). Türkiye’nin enerji açığı sorunu ve çözümüne yönelik arayışlar. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 28(3). 139-158.

Baysal, S. (2021). Elektrikli araçlarda menzile, maliyet ve tüketici algısı ilişkisi. *Otomotiv ve Enerji Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 10-18.

Bektaş, H. (2021). Şarj istasyonu yetersizliğinin elektrikli araç pazarına etkisi. *Ulaştırma ve Otomotiv Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 27-35.

Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı [UNDP]. (2019). *Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri Raporu*. New York: UNDP Yayınları.

BloombergNEF. (2021). *Electric Vehicle Outlook 2021*.

BloombergNEF. (2022). *Battery Pack Prices Fall to an Average of \$132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite*.

BloombergNEF. (2022). *Electric Vehicle Outlook 2022*.

BloombergNEF. (2023). *Electric Vehicle Outlook 2023*.

BNEF (BloombergNEF). (2023). *Electric Vehicle Outlook 2023*. [Farklı atıf formatları birleştirildi]

Boretta, A. (2020). On-board electric vehicles electricity production by high-efficiency internal combustion engines. *Przegad Elektrotechniczny*, 85-90.

Boyle, G. (2019). *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. Oxford: Oxford University Press.

Brand, C., King, J., & Montague, J. N. (2021). The climate change mitigation impacts of active and electric travel: A longitudinal panel study in seven European cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 99, 102983.

Brundtland, G. (1987). *Our Common Future: The World Commission on Environment and Development*. Oxford: Oxford University Press.

Bryson, J. M. (2018). *Strategic Planning for Public and Nonprofit Organizations* (5th ed.). Jossey-Bass.

Cao, H. (2020). The effect of public charging infrastructure on EV range anxiety. *Journal of Sustainable Transport*, 12(3), 140-150.

Carson, R. (1962). *Silent Spring*. Boston: Houghton Mifflin.

Carter, L. (2020). Regional accessibility of EV charging networks: A spatial analysis. *Journal of Transport and Sustainability*, 6(2), 70-83.

Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704–718.

Clancy, J. (2002). Gender and energy policy: Problems, approaches and new opportunities. *Energy for Sustainable Development*, 6(3), 44-49.

Cleveland, C. (2017). *The Concise Encyclopedia of the History of Energy*. London: Routledge.

Crespo, J., Paulo, E., & Vale, S. (2017). Technological innovation and the path to sustainable development: A geographical viewpoint. *Regional Studies*, 51(2), 190-201.

Çakmak, R. & Çiçek, M. (2024), Kapalı Otoparklara Yerleştirilen Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarında Bekleme Süresini En Aza İndirecek Bir Tasarım Yaklaşımı. International Journal of Engineering Research & Development (IJERAD), 2024, Vol 16, Issue 1.

Çınar, E., & Akgül, B. (2018). Hidroelektrik enerji santrallerinin çevresel etkileri: Türkiye örneği. Enerji Politikaları Dergisi, 5(2), 65-75.

Dalton, G. J., Lockington, D. A., & Baldock, T. E. (2009). Feasibility analysis of stand-alone renewable energy supply options for a large hotel. Renewable Energy, 34(4), 955-964.

David, F. R. (2019). Strategic Management: A Competitive Advantage Approach, Concepts & Cases (17th ed.). Pearson.

Deichmann, U., Meisner, C., Murray, S., & Wheeler, D. (2011). The economics of renewable energy expansion in rural Sub-Saharan Africa. Energy Policy, 39(1), 215-227.

Demirbaş, A. (2008). Importance of biomass energy sources for Turkey. Energy Policy, 36(2), 374-380.

Demirbaş, A. (2009). Biofuels securing the planet's future energy needs. Energy Conversion and Management, 50(4), 5-12.

Dess, G. G., McNamara, G., & Eisner, A. B. (2020). Strategic Management: Text and Cases (10th ed.). McGraw-Hill Education.

Dincer, I. (2000). Renewable energy and sustainable development: A crucial review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 4(2), 157-175.

DOE (United States Department of Energy). (2020). Energy Efficiency and Renewable Energy Annual Report. Washington, DC: DOE Yayınları.

DOE (United States Department of Energy). (2020). Vehicle Technologies Office - Annual Progress Report. Washington, DC: DOE Yayınları.

DOE (United States Department of Energy). (2021). Alternative Fuel and Advanced Vehicle Data Center Annual Report. Washington, DC: DOE Yayınları.

Dong, J., Liu, C., & Lin, Z. (2014). Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38, 44–55.

DSİ (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü). (2019). Hidroelektrik enerji potansiyeli raporu. Ankara: DSİ Yayınları.

Durmuş, F. S., & Kaymaz, H. (2020). Elektrikli Araç Şarj Yöntemleri. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 3(2), 123-139.

EEA (European Environment Agency). (2021). Transport and Air Quality in Europe: State and Outlook 2021.

Eker, M., Eser, E., & Günay, İ. (2024). Elektrikli Araçlar için Lityum İyon Bataryalarda Sağlık Ömrünün Belirlenmesi. *Journal of New Results in Engineering and Natural Sciences*, 2023(19), 54-63.

Emeksiz, C., & Fındık, M.M. (2021). Sürdürülebilir Kalkınma İçin Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Ölçeğinde Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (26), 155-164.

Energy Information Administration [EIA]. (2022). Annual Energy Outlook 2022. Washington, DC: EIA.

Erdemir, R. (2022). Küresel enerji piyasalarında elektrikli araçların jeopolitik etkisi. *Siyaset ve Strateji Çalışmaları Dergisi*, 6(1), 105-118.

Erdil, E., & Mert, M. (2021). Elektrikli araç pazarının değerlendirilmesi ve Türkiye perspektifi. *Journal of Energy Research*, 4(2), 20–54.

ETKB (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı). (2020). Yenilenebilir enerji genel görünüm raporu. Ankara: ETKB Yayınları.

ETKB (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı). (2021). Enerjide yerli ve yenilenebilir kaynakların artırılması strateji belgesi. Ankara: ETKB.

EU Commission. (2021). Proposal for a Regulation on the deployment of alternative fuels infrastructure.

- European Automobile Manufacturers' Association [ACEA]. (2022). Market Trends in EV Sales in the European Union. Brussels: ACEA.
- European Commission. (2019). The European Green Deal: Roadmap to zero-emission future. Brüksel: EC.
- European Commission. (2021). Fit for 55: Delivering the EU's 2030 Climate Target. Brussels: EC Publications.
- Eurostat. (2022). Renewable Energy Statistics 2022. Brussels: European Union.
- Goldman, T., & Gorham, R. (2006). Sustainable urban transport: Four innovative directions. *Technology in Society*, 28(1–2), 261–273.
- Goulder, L. H., & Schein, A. (2013). Carbon Taxes vs. Cap and Trade: A Critical Review. *Climate Change Economics*, 4(3), 1-28.
- Göngör, A. (2020). Charging station placement strategies for electric vehicles: A review. *International Journal of Smart Mobility Systems*, 1(2), 71-82.
- Grant, R. M. (2021). *Contemporary Strategy Analysis* (11th ed.). John Wiley & Sons.
- Griggs, D., Stafford-Smith, M., Gaffney, O., Rockström, J., Öhman, M. C., Shyamsundar, P., ... & Noble, I. (2013). Sustainable development goals for people and planet. *Nature*, 495(7441), 305-307.
- Gunningham, N. (2013). Managing the energy trilemma: The case of Indonesia. *Energy Policy*, 54, 319-326.
- Gürbüz, Y., & Kulaksız, A. A. (2016). Elektrikli Araçlar ile Klasik İçten Yanmalı Motorlu Araçların Çeşitli Yönlerden Karşılaştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 117-125. <https://doi.org/10.17714/gufbed.2016.06.011>
- GWEC (Global Wind Energy Council). (2021). Global wind report 2021. Brüksel: GWEC, 20-22.
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., ... & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75–264.

Healy, N., & Barry, J. (2017). Politicizing energy transitions: Fossil fuel divestment and a ‘just transition’. *Energy Policy*, 108, 451–459.

Heidrich, O., Hill, G. A., Neaimeh, M., Hübner, Y., Dawson, R., & Blythe, P. (2017). How do cities support electric vehicles and what difference does it make? *Technological Forecasting & Social Change*, 123, 17–23.

Hill, C. W. L., & Jones, G. R. (2021). *Strategic Management Theory: An Integrated Approach* (13th ed.). Cengage Learning.

Hoffmann, G. (2017). Refrigerants for mobile air conditioning. *ATZ worldwide*, 119(1):16–21.

Holden, E., Linnerud, K., & Banister, D. (2014). Sustainable development: Our common future revisited. *Global Environmental Change*, 26, 130–139.

<https://www.drive.com.au/caradvice/electric-cars-vs-petrol-cars-how-do-they-differ/> Erişim tarihi: 03.12.2024 tarihinde alındı.

<https://www.greenmatch.co.uk/blog/vehicle-to-grid> Erişim tarihi: 11.10.2024 tarihinde alındı.

<https://www.linkedin.com/pulse/electric-vehicle-market-forecast-2024-2030-manideep-patel-m6pgc/> Erişim tarihi: 27.08.2024 tarihinde alındı.

<https://www.mfa.gov.tr/yenilenebilir-enerji-kaynaklari.tr.mfa> Erişim tarihi: 10.12.2024 tarihinde alındı.

<https://www.recurrentauto.com/research/costs-ev-battery-replacement> Erişim tarihi: 14.09.2024 tarihinde alındı.

<https://www.sustainabilitybynumbers.com/p/electric-car-range> Erişim tarihi: 17.06.2024 tarihinde alındı.

IEA (International Energy Agency). (2019). *World energy outlook 2019*. Paris: IEA.

IEA (International Energy Agency). (2020). *Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025*. Paris: IEA.

IEA (International Energy Agency). (2021). Global EV Outlook 2021. Paris: IEA, 42-65.

IEA (International Energy Agency). (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: IEA Publications.

IEA (International Energy Agency). (2022). Global EV Outlook 2022. Paris: IEA Publications (s. 14-53)

IEA (International Energy Agency). (2022). Global EV Outlook 2022.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2018). Global Warming of 1.5 °C. Geneva: IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Geneva: IPCC.

International Energy Agency [IEA]. (2021). Global EV Outlook 2021. Paris: IEA.

International Renewable Energy Agency [IRENA]. (2021). Renewable Capacity Statistics 2021. Abu Dhabi: IRENA.

International Renewable Energy Agency [IRENA]. (2023). Renewable Capacity Statistics 2023. Abu Dhabi: IRENA.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2018). Global warming of 1.5°C: Summary for policymakers. IPCC.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, 145-205.

IRENA (International Renewable Energy Agency). (2020). Global renewables outlook. Abu Dhabi: IRENA.

IRENA (International Renewable Energy Agency). (2021). Renewable Power Generation Costs in 2020. Abu Dhabi: IRENA.

Islam,M., Ahsan, Md. S., Rahman, Md. K., Tanvir, F.A. (2023). Advancements in Battery Technology for Electric Vehicles: A Comprehensive Analysis of Recent Developments. 1-28

IUCN. (1980). World Conservation Strategy: Living Resource Conservation for Sustainable Development. Gland: IUCN-UNEP-WWF.

İbrahim, A., & Gürsoy, M. (2021). Katı hal bataryalar: Yeni nesil enerji depolama teknolojileri. Batarya ve Pil Teknolojileri Dergisi, 2(3), 45-46.

İnci, Çelik, Lashab, Bayındır, Vasquez, Guerrero (2024). Power System Integration of Electric Vehicles: A Review on Impacts and Contributions to the Smart Grid, 4.

Jacobsson, S., & Bergek, A. (2004). Energy system transformation: The evolution of technological systems in renewable energy technology. Energy Policy, 32(2), 209-222.

Jia, H., & Wang, L. (2020). Emerging software trends for electric and autonomous vehicles. Automotive Software Engineering Journal, 6(2), 95-102.

Johnson, G., Scholes, K., & Whittington, R. (2020). Exploring Corporate Strategy (12th ed.). Pearson.

Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 894-900.

Kaldellis, J. K., Kapsali, M., & Katsanou, E. (2013). Renewable energy applications in Greece—What is the public attitude? Energy Policy, 57, 98-108.

Kalkbrenner, B. J., & Roosen, J. (2016). Citizens' willingness to participate in local renewable energy projects: The role of community and trust in Germany. Energy Research & Social Science, 13, 60-70.

Karaca, İ. (2021). Elektrikli araç bataryalarında enerji yoğunluğu ve menzil analizi. Teknik Bilimler ve Ulaşım Dergisi, 2(3), 42-53.

Kaygusuz, K. (2012). Energy for sustainable development: A case of developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1116-1126.

Keles, M. (2019). Impact of Electric Vehicle Integration on the Turkish Power Grid (Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Kerem, A. (2014). Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(1), 1-13.

Kılınç, T. (2021). Elektrikli araçların ikinci el pazarında batarya etkisi. *Ekonomi ve Sektör Analizleri Dergisi*, 6(2), 20-27.

Kırmızıgül, İ. E., & Baykal, B. (2023). Elektrikli Araç Tercihinde Tüketici Motivasyonu. *Sosyal Bilimler Metinleri*, 2023(2), 223-241. <https://doi.org/10.56337/sbm.1352994>

Kim, J., & Seo, B. (2020). OTA güncellemeleri ve otonom sürüş teknolojilerinin entegrasyon analizi. *Mühendislik ve Mobilite Araştırmaları Dergisi*, 5(3), 60-70.

Koçaslan, G. (2014). Türkiye'nin enerji verimliliği mevzuatı, Avrupa Birliği'ndeki uluslararası-ulusal öneriler". Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 15(2), 117-133.

Kotler, P., & Armstrong, G. (2020). *Principles of Marketing* (17th ed.). Pearson.

Kotler, P., & Keller, K. L. (2021). *Marketing Management* (16th ed.). Pearson.

Kowalski, D. J. ve Depta, A. (2019). Sustainable Development in Electromobility. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej*, 73, 69-80.

Köksal, E., Ardiyok, Ş., & İkiler, B. (2024). Türkiye'de Elektrikli Araçlar için Şarj Altyapısı Nasıl Yaygınlaşır?, *Ekonomi-Tek*, 13(1), 84-121.

KPMG. (2021). *Global Automotive Executive Survey*.

Kumar, S., & Liu, Y. (2020). Power grid constraints for high-density EV chargers in rural areas. *IEEE Transactions on Smart Grids*, 11(3), 240-253.

Kuzu, B.,Nurmuhammed, M., Akdağ, O., Karadağ, T. (2024). V2G Uygulamalarında Elektrikli Araçların Dağıtım Şebekesine Optimum Entegrasyonunun Analizi İçin Newton Raphson Temelli Yeni Bir Model, 375-385.

Larminie, J., & Lowry, J. (2012). Electric Vehicle Technology Explained (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Lavieri, P. & Olivera, G. (2021). Electric Vehicle Charging Consumer Survey: Insights Report. University of Melbourne, 1-65.

Li, J., & Wang, F. (2020). China's Renewable Energy Transition: The Role of Technological Innovation and Policy Implementation. Energy Science & Engineering, 8(2), 108-120.

Li, Y., Davis, C., Lukszo, Z. ve Weijnen, M. (2016). Electric Vehicle Charging in China's Power System: Energy, Economic and Environmental Trade-Offs and Policy Implications. Applied Energy, 173, 535-554.

Machedon-Pisu, M. ve Borza, P. N. (2020). Are Personal Electric Vehicles Sustainable? A Hybrid E-Bike Case Study. Sustainability, 12, 32, 1-24.

Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., & Behrens, W. (1972). The Limits to Growth. New York: Universe Books.

Meadows, D., Randers, J., & Meadows, D. (2004). Limits to Growth: The 30-Year Update. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing.

MEB (Milli Enerji Birliği). (2021). Elektrikli Araçlar ve Şarj Altyapısı Raporu. Ankara: MEB Yayınları.

MEB (Milli Enerji Birliği). (2021). Elektrikli Araçlar ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Raporu. Ankara: MEB Yayınları.

MEB (Milli Enerji Birliği). (2021). Elektrikli Taşıtlar ve Batarya Teknolojileri Raporu. Ankara: MEB Yayınları.

MEB (Milli Enerji Birliği). (2021). Yenilenebilir Enerji ve Elektrikli Araçlar Raporu. Ankara: MEB Yayınları.

Menak, R., Karadağ, T., Altuğ, M., Tan, N. (2021). Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemleri Üzerine Bir Derleme Çalışması. Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation, 8(2), 234-275.

Mishra, M., & Saxena, D. (2021). Electric vehicles in developing countries: The case for sustainable transport. Environmental Science and Pollution Research, 28(27), 35184–35196.

Mozafar, M.R, Amini, M. H., Moradi, M. H. (2018). Innovative appraisalment of smart grid operation considering large-scale integration of electric vehicles enabling V2G and G2Vsystems. Electric Power Systems Research,154-245.

Mucuk, İ. (2019). Pazarlama İlkeleri (25. basım). Türkmen Kitabevi.

Nasrallah, Y., Al-Anbagi, Y.I., Mouftah, H. T., "Mobility impact on the performance of electric vehicle-to-grid communications in smart grid environment", Proceedings of The IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC), (2015)

National Renewable Energy Laboratory [NREL]. (2019). Energy Storage Technology Market Report. Washington, DC: NREL.

National Renewable Energy Laboratory [NREL]. (2021). Energy Storage Technology Market Report. Washington, DC: NREL.

Nguyen, D., & Park, S. (2021). V2G-based peak load management and resilience in power systems. Sustainable Grid Technologies Journal, 5(4), 360-375.

Norwegian EV Association. (2021). Norwegian EV Policy.

Nykvist, B., & Nilsson, M. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. Nature Climate Change, 5(4), 329–332.

OECD/IEA (2021). Renewables 2021: Analysis and forecast to 2026. Paris: IEA.

Orta, G. (2022). Elektrikli araç şarj istasyonlarında güç yönetimi ve şebeke entegrasyonu. *Mühendislik ve Enerji Teknolojileri Dergisi*, 2(2), 30-42.

Ortiz, S. (2021). Women in renewable energy: The role of micro-financing. *Energy Research & Social Science*, 79, 94-100.

Ou, X., Yan, X., & Zhang, X. (2021). Using life-cycle thinking to assess the sustainability benefits of electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 55–62.

Öner, M. (2021). Elektrikli araç altyapısında yatırım modelleri ve paydaş analizi. *Pazarlama ve Tüketici Araştırmaları Dergisi*, 10(2), 75-83.

Öymen, G. Ve Ömeroğlu M. (2020). Yenilenebilir Enerjinin Sürdürülebilirlik Üzerindeki Rolü, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* Yıl:19 Sayı:39 Güz:2020/3 s. 1069-1087.

Özbay, H., Közkurt, C., Dalcalı, A., Tektaş, M. (2020). Geleceğin Ulaşım Tercihi: Elektrikli Araçlar. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 3(1), 34-50.

Özçelik, E., & Mert, M. (2020). Türkiye’de yenilenebilir enerji yatırımlarının finansmanı ve risk analizi. *Enerji Piyasaları Dergisi*, 8(3), 100-120.

Özdemir, E. (2021). Rekabet Avantajının Korunmasında Kaynak Bazlı Yaklaşım. *Der Yayınları*.

Özer, M. (2021). Electricity decarbonization and electric vehicles in emerging economies: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126030.

Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513-1524.

Patel, A. (2019). Advancements in EV battery design and weight reduction strategies. *Automotive Battery Innovation Journal*, 3(2), 65-78.

Pearce, D., & Turner, R. (1990). *Economics of natural resources and the environment*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

- Peterson, L. (2021). The second-hand EV market: Battery degradation and residual value. *Journal of Sustainable Transportation*, 15(1), 34-44.
- Polat, M. (2020). Elektrikli araç politikalarının enerji güvenliğine etkileri. *Uluslararası Enerji Politikaları ve Stratejileri Dergisi*, 3(1), 101-115.
- Porter, M. E. (1998). *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*. Free Press.
- Qian, K., Zhou, C., Yuan, Y., & Wu, J. (2013). A hierarchical method for planning and operating an electric vehicle charging system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 764–773.
- Reid, W. (1995). *Environmental Threats and Opportunities*. Washington, DC: World Resources Institute.
- Reuter, M. (2020). Limits and opportunities of recycling lithium-ion batteries in the circular economy. *Sustainable Energy Technology & Policy*, 5(3), 195-207.
- Rezvani, Z., Jansson, J., & Bengtsson, M. (2018). Consumer motivations for sustainable consumption: The interaction of gain, normative and hedonic motivations on electric vehicle adoption. *Business Strategy and the Environment*, 27(8), 1272-1283.
- Rogers, P. P., Jalal, K. F., & Boyd, J. A. (2008). *An introduction to sustainable development*. London: Earthscan.
- Rong, K., Shi, Y., Shang, T., Chen, Y., ve Hao, H. (2017). Organizing business ecosystems in emerging electric vehicle industry: Structure, mechanism, and integrated configuration. *Energy Policy*, 107, 234-247.
- Roskill. (2020). *Lithium: Global Supply and Demand Analysis 2020-2030*. London: Roskill Information Services.
- Sadorsky, P. (2009). Renewable energy consumption and income in emerging economies. *Energy Policy*, 37(10), 4021-4028.

Sahin, U., & Söylemez, C. (2019). Ekosistem hizmetleri ve hidroelektrik santraller: Türkiye örneği. *Ekoloji ve Çevre Bilimleri Dergisi*, 7(2), 110-120.

Said, R., Qazi, S., & Batool, M. (2021). Emergence of EV battery second-life applications: Market analysis and policy insights. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128217.

Sen, A. (1999). *Development as Freedom*. Oxford: Oxford University Press.

Sendek-Matysiak, E. (2019). Electric Cars as a New Mobility Concept Complying with Sustainable Development Principles. *AIP Conference Proceedings*, 2078, 020026.

Sevük,D. (2021). Elektrikli araçların fosil yakıtlı araçların yerini almasının sürdürülebilir kalkınma hedeflerine etkisi. *Enerji ve Çevre Dergisi*, 165(2), 26-32.

Sezer, O. (2021). Elektrikli araçlarda hızlı şarj altyapısının fizibilite analizi. *Teknik ve Bilimsel Çalışmalar Dergisi*, 4(2), 47-57.

Sims, R., Schaeffer, R., Creutzig, F., et al. (2014). Transport. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* (pp. 599–670). Cambridge University Press.

Sovacool, B. K. (2009). The cultural barriers to renewable energy and energy efficiency in the United States. *Technology in Society*, 31(4), 365-373.

Sovacool, B. K., & Dworkin, M. H. (2015). Energy justice: Conceptual insights and practical applications. *Applied Energy*, 142, 435-444.

Sovacool, B. K., Axsen, J., & Kempton, W. (2017). The future promise of vehicle-to-grid (V2G) integration: A sociotechnical review and research agenda. *Energy Policy*, 110, 274–285.

Sovacool, B. K., Graaf, T. V. D., & Bakker, S. J. (2018). The precarious political economy of cobalt: Balancing prosperity, security, and sustainability in the cobalt supply chain. *Global Environmental Change*, 52-73, 205–215.

Söderholm, P., & Klaassen, G. (2007). Wind power in Europe: A simultaneous innovation–diffusion model. *Environmental & Resource Economics*, 36(2), 163-190.

Spath, P. L., & Mann, M. K. (2004). Life cycle assessment of renewable energy systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 152-176.

Sperling, D. (2018). *Three Revolutions: Steering Automated, Shared, and Electric Vehicles to a Better Future*. Island Press.

Stern, N. (2018). Public Economics as if Time Matters: Climate Change and the Dynamics of Policy. *Journal of Public Economics*, 162, 4-17.

Stiglitz, J. (2019). *People, Power, and Profits: Progressive Capitalism for an Age of Discontent*. New York: W.W. Norton.

Sun, Y. (2021). Impacts of ultra-fast charging on local distribution networks. *Energy Conversion and Management*, 234, 200-210.

Şen, Z. (2021). Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Kullanımında Yeni Eğilimler. *Enerji Teknolojileri Dergisi*, 8(1), 31-38.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETKB]. (2020). *Enerjide yerli ve yenilenebilir kaynakların artırılması strateji belgesi*. Ankara: ETKB.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETKB]. (2023). *Türkiye Enerji Görünümü Raporu 2023*. Ankara: ETKB.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2021). *Ulusal Enerji ve Maden Politikaları Raporu*. Ankara: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yayınları, 22-31.

T.C. Sağlık Bakanlığı. (2019). *Hava Kirliliği ve Halk Sağlığı Üzerine Etkileri*. Ankara: Sağlık Bakanlığı Yayınları, 33.

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2021). *Türkiye’de Elektrikli Araç Ekosisteminin Geliştirilmesi Raporu*. Ankara: T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Yayınları, 15-25.

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2020). *Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi*. Ankara: Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Yayınları, 10-18.

Tekin, K. (2022). *İşletmeler için Stratejik Yönetim*. Seçkin Yayıncılık.

Thompson, A. A., Strickland, A. J., & Gamble, J. E. (2021). *Crafting and Executing Strategy* (22nd ed.). McGraw-Hill Education.

Thompson, R. (2020). Battery cycle life variations under different charging protocols. *Journal of Electrochemical Advances*, 6(4), 258-272.

Thorhauge, M., Rich, J. & Mabit, S.E. (2024). Charging behaviour and range anxiety in long-distance EV travel: an adaptive choice design study. 1-23. <https://doi.org/10.1007/s11116-024-10561-x>

TMMOB (Makina Mühendisleri Odası). (2024). *Elektrikli Araçların Kullanımı ve Yangın Güvenliği*. Ankara: TMMOB Yayınları, 1-18.

Toksöz, M. (2020). *Elektrikli Araçların Sürdürülebilirlik ve Enerji Politikaları Açısından Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi)*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Tören M., Mollahasanoğlu H., “Elektrikli ve Hibrit Araçlardaki Elektrik Motorlarının İçten Yanmalı Motorlarda Oluşan CO2 Emisyonunda Meydana Getireceği Değişimin Tahmini ve Verimliliğe Etkisi: Türkiye Örnekleme”, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2022, 9 (3); 1082-1097.

Transport & Environment. (2022). *The Road to Zero-Emission Cars: Opportunities and Challenges*.

Tsiropoulos, I., Tarvydas, D ve Lebedeva, N. (2018). *Li-ion Batteries for Mobility and Stationary Storage Applications- Scenarios for Costs and Market Growth*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Tuncer, M. (2019). Elektrikli araç pazarında AR-GE ve ölçek ekonomisi faktörleri. *Mühendislik ve Enerji Teknolojileri Dergisi*, 4(2), 58-70.

Tury, G. (2019). Electromobility in the Automotive Industry. What Role Does Technology Change Play in Geographic Pattern of Production? *Global Economic Observer*, 7(2), 112-120.

TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu). (2020). Elektrikli ve Hibrit Araç Teknolojileri Raporu. Ankara: TÜBİTAK Yayınları, 55-81.

TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu). (2021). Dış ticaret istatistikleri. Ankara: TÜİK Yayınları.

TÜREB (Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği). (2022). Türkiye rüzgâr enerji istatistikleri raporu. Ankara: TÜREB.

Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB). (2021). Türkiye rüzgâr enerji istatistikleri raporu. Ankara: TÜREB.

Twidell, J., & Weir, T. (2015). Renewable Energy Resources. Routledge

U.S. DOE (United States Department of Energy). (2021). Zero Emission Vehicle Program: State of Adoption in the U.S. Washington, DC: DOE.

UN (United Nations). (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. New York: UN.

UN (United Nations). (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1.

UNDP (United Nations Development Programme). (2019). Human development report 2019. New York: UNDP.

UNEP (United Nations Environment Programme). (2020). Nature-based solutions for climate change mitigation. Nairobi: UNEP.

United Nations [UN]. (1972). Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment. Stockholm: UN.

United Nations [UN]. (1992). Agenda 21. Rio de Janeiro: UN.

United Nations [UN]. (2012). The Future We Want: Outcome Document. Rio de Janeiro: UN.

United Nations [UN]. (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: UN.

United Nations Development Programme [UNDP]. (2019). Human Development Report. New York: UNDP.

W, A. (2015). Mikro ve Makro Etkileri Yönünden Elektrikli Otomobiller (Türkiye Ekonomisi Örneği). Marmara Üniversitesi İktisadi e İdari Bilimler Dergisi, 36(1), 269-291.

Wang, M., Li, Y., Liu, X., & Meng, Y. (2021). Impacts of large-scale renewable energy development on biodiversity and ecosystem services. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 148, 111-120.

WCED (World Commission on Environment and Development). (1987). Our Common Future. Oxford University Press.

Wheelen, T. L., & Hunger, J. D. (2022). Strategic Management and Business Policy (16th ed.). Pearson.

World Bank. (2020). Energy and sustainable development. Washington, D.C.: World Bank.

World Bank. (2020). World Development Report 2020: Trading for Development in the Age of Global Value Chains. Washington, DC: World Bank.

World Bank. (2021). World Development Report 2021: Data for Better Lives. Washington, DC: World Bank.

World Bank. (2022). World Development Report 2022: Finance for an Equitable Recovery. Washington, DC: World Bank.

World Commission on Environment and Development [WCED]. (1987). Our Common Future. Oxford: Oxford University Press.

Wüstenhagen, R., Wolsink, M., & Bürer, M. J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. Energy Policy, 35(5), 2683-2691.

Xu, B., Li, Q., & Zhao, Y. (2022). Advanced battery materials and emerging trends in EV industry. Electrochemical Energy Review, 4(2), 105-120.

Xu, Y., & Yang, C. (2021). Sustainable e-mobility: Integrating renewables with EV charging infrastructure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151.

Yaman, H. (2018). *Enerji ve Çevre: Sürdürülebilirlik ve İklim Değişikliği*. Bursa: Ekin

Yılmaz, M., Çınar, E., & Yazıcı, A. (2024). Elektrikli Araçlarda Otonom Batarya Yönetim Sistemi Literatür İncelemesi. *EMO Bilimsel Dergi*, 14(2), 7-22.

Yu, H., Niu, S., Shang, Y., Shao, Z., Jia, Y., Jian, L. (2022). Electric vehicles integration and vehicle-to-grid operation in active distribution grids: A comprehensive review on power architectures, grid connection standards and typical applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Zhang, Q., Li, H., Zhu, L., Campana, P. E., Lu, H., Wallin, F. ve Sun, Q. (2018). Factors influencing the economics of public charging infrastructures for EV—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 500-509.

Zhao, H., Wang, L., Chen, Z., He, X. (2019). Challenges of Fast Charging for Electric Vehicles and the Role of Red Phosphorous as Anode Material: Review. *Energies* 12(20):3897, 1-23.

Zhou, Y. ve Li, S. (2018). Technology adoption and critical mass: The case of the US electric vehicle market. *The Journal of Industrial Economics*, 66(2), 423-480.