



**NET SIFIR EMİSYON HEDEFİNE DOĞRU:
TÜRKİYE'DEKİ ULAŞTIRMA SEKTÖRÜNÜN ELEKTRİK ARZINA
GÖRE UZUN DÖNEMLİ ENERJİ MODELLEMESİ**

Onur DÖNMEZÇELİK

**DOKTORA TEZİ
İSTATİSTİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Onur DÖNMEZÇELİK

11/05/2023

NET SIFIR EMİSYON HEDEFİNE DOĞRU: TÜRKİYE'DEKİ ULAŞTIRMA
SEKTÖRÜNÜN ELEKTRİK ARZINA GÖRE UZUN DÖNEMLİ ENERJİ
MODELLEMESİ

(Doktora Tezi)

Onur DÖNMEZÇELİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2023

ÖZET

Ulaştırma sektörü sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip en önemli sektörlerden biridir. 2053 net sıfır emisyon hedefi için önemli bir girdi olacak elektrifikasyonun ulaştırma sektörü için ana strateji haline gelmesi beklenmektedir. Bu nedenle bu çalışmada ulaştırma sektörü için tasarlanan emisyon azaltım politikalarının net sıfır emisyon hedefi için nasıl bir rol oynayabileceğinin analizi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda mevcut politikalar ve iddialı emisyon azaltım politikaları dikkate alınarak çeşitli senaryolar hazırlanmıştır. Bu senaryolar Türkiye Enerji Sistemi Modeli temelinde tasarlanan Türkiye Ulaştırma Sektörü Enerji Modeli ile analiz edilmiştir. Buna göre CO₂ standartları ve teknoloji kısıtlamaları gibi düşük karbon politikalarının zamanlaması ile ulaşım tercihlerindeki davranış değişikliği politikalarının Türkiye'nin net sıfır emisyon hedefine oldukça önemli katkı sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Bununla beraber ulaşım sektöründe artan elektrifikasyon ile oluşan elektrik talebi de modelin arz modülünde optimize edilmiştir. Buna göre de ulaşım sektörünün elektrik arzına getireceği ek kurulu güç ihtiyacı ve yatırım maliyeti ortaya çıkarılmıştır.

Bilim Kodu : 20517
Anahtar Kelimeler : Net sıfır emisyon, ulaştırma politikaları, elektrikli araçlar
elektrifikasyon, elektrik arzı
Sayfa Adedi : 123
Danışman : Prof. Dr. H. Hasan ÖRKÇÜ

TOWARDS NET ZERO EMISSIONS TARGET: LONG-TERM ENERGY
MODELLING ACCORDING TO ELECTRICITY SUPPLY OF THE TRANSPORT
INDUSTRY IN TÜRKİYE

(Ph. D. Thesis)

Onur DÖNMEZÇELİK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2023

ABSTRACT

The transport sector is one of the most important sectors with the potential to reduce greenhouse gas emissions. Electrification, which will be an important input for the 2053 net zero emission target, is expected to become the main strategy for the transport sector. Therefore, it is aimed to analyze how the emission reduction policies designed for the transport sector can play a role in achieving the net zero emission target in this study. For this purpose, various scenarios have been prepared by taking into account current policies and ambitious emission reduction policies. These scenarios were analyzed with the Türkiye Transport Sector Energy Model, which was designed on the basis of the Türkiye Energy System Model. Accordingly, it was concluded that the timing of low-carbon policies such as CO₂ standards and technology restrictions, as well as behavioral change policies in transport preferences, will contribute significantly to the net zero emission target of Türkiye. In addition, the electricity demand occurred by the increasing electrification in the transport sector has been optimized in the supply module of the model. Accordingly, the additional installed power requirement and investment cost that the transport sector will bring to the electricity supply have been revealed.

Science Code : 20517
Key Words : Net zero emissions, transport policies, electric vehicles
electrification, electricity supply
Page Number : 123
Supervisor : Prof. Dr. H. Hasan ÖRKÇÜ

TEŞEKKÜR

Dünya'nın en ünlü Yönetim Bilimcisi Peter Drucker'ın “Ölçemediğiniz Şeyi Kontrol Edemezsiniz, Kontrol Edemediğiniz Şeyi Yönetemezsiniz!” vurgusuyla nihai enerji tüketimini oluşturan sektörlerin ve elektrik sektörünün analiz edilmesi, kısa/orta/uzun vadeli enerji stratejilerinin belirlenmesi ve beklenen ile ortaya çıkacak sonuçlar arasındaki sapmaların minimize edilmesi açısından oldukça önemlidir.

İklim değişikliği en büyük çevresel, sosyal ve ekonomik tehditlerden birini teşkil etmekte olup sera gazı emisyonları bu değişikliğe neden olan en önemli etkenlerden biridir. Bu nedenle sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik politikalar ve stratejiler belirleyen birçok ülke 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedeflerini açıklamaktadır. “2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi” belirleyen Türkiye kapsamında, önemli bir nihai enerji tüketim ve CO₂ emisyon miktarına sahip olan ulaştırma sektörü, emisyon azaltım politikalarında önemli bir konumda bulunmaktadır. Bu anlamda net sıfır emisyon hedefi kapsamında yapılan ilk akademik çalışmalardan biri olan bu çalışmada, emisyon azaltımına yönelik iddialı ulaştırma politikalarının ve stratejilerinin Türkiye’de de uygulanması durumunda bu uygulamaların “2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi” üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi amaçlanmaktadır.

Bu kapsamda bu çalışmada ve doktora eğitimim boyunca değerli yardım ve katkılarını hiç esirgememiş olan değerli bilim insanı, Danışman hocam Prof. Dr. H. Hasan ÖRKÜ’ye, tasarım, analiz ve raporlama sürecinde yer almaktan onur ve gurur duyduğum Türkiye kamu iş gücüyle hazırlanmış en önemli enerji modeli tasarımlarının başında gelen Türkiye Enerji Sistemi Modeli’nin hazırlık sürecinde yer alan IPA proje ekibi ve sektör uzmanlarına en içten teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu yaşlara ve kariyere ulaşmamda maddi manevi büyük emekleri olan çok değerli aileme ve doktora eğitim süresinde gösterdiği sevgisi ve hoşgörüsüyle değerli eşim Müge’ye yürekten teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ULAŞTIRMA SEKTÖRÜ GENEL GÖRÜNÜMÜ	5
2.1. Genel Tanım ve Ulaştırmanın Önemi	5
2.2. Yolcu ve Yük Taşımacılığı	7
2.2.1. Karayolu taşımacılığı	8
2.2.2. Demiryolu taşımacılığı ve boru hatları	9
2.2.3. Denizyolu taşımacılığı	9
2.2.4. Havayolu taşımacılığı	10
2.2.5. Modlar arası taşımacılık.....	10
2.3. Ulaştırmanın Enerji ve Çevre ile İlişkisi.....	11
2.3.1. Ulaştırma ve enerji.....	11
2.3.2. Ulaştırma ve çevre	14
2.3.3. Ulaştırma sektöründe temiz enerji teknolojileri ve elektrifikasyon	18
2.4. Ulaştırma Politikaları	30
2.4.1. Politika araçları	30
2.4.2. Politika uygulamaları	32

	Sayfa
2.5. Elektrik ve Ulaştırma Sektörlerinde Net Sıfır Emisyon Hedefleri	38
2.5.1. Elektrik sektörü.....	38
2.5.2. Ulaştırma sektörü	41
3. LİTERATÜR TARAMASI	47
3.1. Aşağıdan Yukarıya Modeller	49
3.1.1. Optimizasyon Modelleri	49
3.1.2. Simülasyon modelleri	51
3.1.3. Muhasebe modelleri.....	51
3.1.4. Çok aracıli modeller.....	51
3.2. Yukarıdan Aşağıya Modeller	52
3.2.1. Giriş-Çıkış (I/O) modelleri	52
3.2.2. Hesaplanabilir genel denge (CGE) modelleri	53
3.2.3. Ekonometrik modeller	54
3.2.4. Entegre değerlendirme modelleri (IAM'ler)	55
3.3. Hibrit Modeller.....	57
3.4. Çalışma Kapsamında Benzer Modelleme Çalışmaları.....	58
4. METODOLOJİ	61
4.1. Modelin Genel Tanıtımı ve Seviyelendirilmesi	61
4.2. Modelin Matematiksel Yapısı	62
4.2.1. Kesikli seçim teorisi.....	63
4.2.2. Karışık tamamlama problemi.....	65
5. MODELİN VERİ ANALİZİ, VARSAYIMLARI, KALİBRASYONU .	69
5.1. Modelde Kullanılan Veriler ve Değişkenler	69
5.2. Veri Analizi ve Aktivite Projeksiyonları.....	70
5.3. Kalibrasyon	72

	Sayfa
5.4. Senaryoların Tasarımı ve Temel Varsayımlar	74
6. UYGULAMA	77
6.1. Yolcu ve Yük Talebi Aktiviteleri Gelişimi	77
6.2. CO ₂ Eşdeğeri Emisyonlar	79
6.2.1. Ulaştırma moduna göre emisyonlar	83
6.3. Yakıt Talebi Gelişimi	84
6.4. Elektrifikasyon Görünümü	88
6.4.1. Ulaştırma sektörü etkisi altında elektrik üretimi portföyü	91
6.5. Araç Türü ve Motor Teknolojisine Göre Stok Gelişimi	96
6.6. Model Sonuçlarının Diğer Çalışmalar ile Karşılaştırılması	98
6.6.1. Nihai enerji tüketimi ve CO ₂ emisyonları	98
6.6.2. Yatırım maliyetleri	100
6.7. Duyarlılık Analizi	101
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	103
KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	123

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bin kişiye düşen araç sayısı	7
Çizelge 2.2. Yolcu kilometre içinde araç türü dağılımı	7
Çizelge 2.3. Ton kilometre içinde ulaştırma türü dağılımı	7
Çizelge 2.4. Nihai enerji tüketimi ve ulaştırma sektörü.....	12
Çizelge 2.5. Türkiye'nin ulaştırma sektörü bazında enerji denge tablosu	12
Çizelge 2.6. Ülkeler bazında toplam emisyonlar ve ulaştırma sektörünün payı.....	14
Çizelge 2.7. Ulaştırma sektörü bazında ülkelerin emisyonlarının ulaştırma türü dağılımları	15
Çizelge 2.8. Özelliklerine göre Türkiye'deki karayolu uzunlukları	36
Çizelge 2.9. Türkiye ve AB ülkelerinde ön plana çıkan ulaştırma politikaları.....	37
Çizelge 2.10. Emisyon azaltımı için çeşitli kaldıraçlar.....	37
Çizelge 2.11. 2050 yılında net sıfır emisyon için elektrik sektörü görünümü-2.....	40
Çizelge 2.12. 2050 yılında net sıfır emisyon için ulaştırma sektörü görünümü-3.....	45
Çizelge 3.1. Yukarıdan-aşağıya ve aşağıdan-yukarıya modelleme özellikleri	48
Çizelge 3.2. Aşağıdan yukarıya modeller	49
Çizelge 4.1. TUSEM ağaç diyagramı	62
Çizelge 4.2. TUSEM model fonksiyonu	63
Çizelge 4.3. TUSEM'deki aktivitelerin seviyelendirilmesi ve maliyet türleri	66
Çizelge 5.1. TUSEM'de kullanılan değişkenler ve kısıtlar	69
Çizelge 5.2. TUSEM'de kullanılan değişkenler ve kısıtlar-2	70
Çizelge 5.3. TUSEM'in verilerinin kalibrasyonu	73
Çizelge 5.4. Model senaryoları ve politika eylemleri	75
Çizelge 6.1. Yolcu km'nin ulaştırma türlerine göre gelişimi.....	77
Çizelge 6.2. Ton km'nin ulaştırma türlerine göre gelişimi	78

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.3. Baz yıl ulaşım tercihleri korunmuş senaryolarda ulaşım türü emisyonları	79
Çizelge 6.4. Ulaşım tercihleri değişmiş senaryolarda ulaşım türü emisyonları.....	80
Çizelge 6.5. Senaryolar bazında ulaştırma moduna göre emisyon miktarları	83
Çizelge 6.6. NSE* senaryosu bazında ulaştırma sektörü elektrik talebinin elektrik arzında yarattığı görünüm	94
Çizelge 6.7. NSE* senaryosu bazında ulaştırma sektörü elektrik talebinin elektrik arzına getirdiği ek maliyet	95
Çizelge 6.8. Ulaştırma kaynaklı nihai enerji tüketimi ve emisyonların karşılaştırılması	99
Çizelge 6.9. Senaryolara göre ulaştırma sektörü yatırım harcamaları	100
Çizelge 6.10. Senaryolara göre duyarlılık analizi sonuçları	102

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Farklı ulaşım modlarının enerji yoğunluklarının karşılaştırılması	13
Şekil 2.2. Bazı ülkelerde ve bölgelerde yıllar itibarıyla elektrikli araç sayısı	21
Şekil 2.3. Bazı ülkelerde ve bölgelerde yıllar itibarıyla elektrikli araç satışı ve oranları	21
Şekil 2.4. Dünyada elektrikli araç model sayısı ve ortalama menzilleri.....	22
Şekil 2.5. Bazı ülkelerde ve bölgelerde elektrikli araçların boyutuna göre model sayıları.....	22
Şekil 2.6. Avrupa’da ve Çin’de elektrikli araçların fiyat dağılımı	23
Şekil 2.7. Bazı ülkelerde ve bölgelerde elektrikli hafif ticari araç sayısı	24
Şekil 2.8. Bazı ülkelerde ve bölgelerde elektrikli otobüslerin sayısı ve satış oranları....	25
Şekil 2.9. Bazı ülkelerde ve bölgelerde elektrikli kamyonların sayısı ve satış oranları .	26
Şekil 2.10. 2050 yılında net sıfır emisyon için elektrik sektörü görünümü	39
Şekil 2.11. 2050 yılında net sıfır emisyon için ulaştırma sektörü görünümü	41
Şekil 2.12. 2050 yılında net sıfır emisyon için ulaştırma sektörü görünümü-2	42
Şekil 3.1. Enerji modelleri yaklaşımları	48
Şekil 4.1. TUSEM'deki aktivitelerin dağıtım adımları ve fonksiyonları	65
Şekil 5.1. 2025-2055 yılları nüfus ve gsyh tahminleri.....	70
Şekil 5.2. Kişi başı GSYH ve kilometre ilişkisi.....	72
Şekil 5.3. 2025-2055 yılları pkm ve tkm gelişim öngörüsü.....	72
Şekil 5.4.Yıllar boyunca Türkiye’deki yutak alanların karbon tutma miktarı.....	76
Şekil 6.1. Ulaştırma türlerine göre yolcu km’nin tahmin döneminde dağılımı	78
Şekil 6.2. Ulaştırma türlerine göre ton km’nin tahmin döneminde dağılımı	79
Şekil 6.3. Senaryolar bazında toplam ulaştırma emisyonlarının gelişimi.....	81
Şekil 6.4. Senaryolar bazında ulaştırma türü emisyonları	82
Şekil 6.5. Senaryolar bazında ulaştırma moduna göre emisyon gelişimi	84

Şekil	Sayfa
Şekil 6.6. Senaryolara göre nihai enerji tüketimi gelişimi.....	85
Şekil 6.7. Senaryolara göre yolcu ve yük taşımacılığı nihai enerji tüketimi gelişimi.....	85
Şekil 6.8. Senaryolara göre yolcu taşımacılığı araç modları nihai enerji tüketimleri	86
Şekil 6.9. Senaryolara göre yük taşımacılığı araç modları nihai enerji tüketimleri	87
Şekil 6.10. Senaryolara göre nihai enerji tüketiminde yakıtların kullanım payları	87
Şekil 6.11. Senaryolara göre nihai enerji tüketiminde yakıtların alt kısımları	88
Şekil 6.12. Senaryolara göre ulaştırma sektörü elektrik talebi	89
Şekil 6.13. Senaryolara göre elektrik tüketim payının gelişimi	89
Şekil 6.14. Senaryolara göre yolcu taşımacılığı modlarında elektrifikasyon gelişimi.....	90
Şekil 6.15. Senaryolara göre yük taşımacılığı modlarında elektrifikasyon gelişimi	90
Şekil 6.16. Senaryolara göre elektrik tüketiminin araç modlarına göre oranı	91
Şekil 6.17. Araç türüne göre stok gelişimi.....	96
Şekil 6.18. Yolcu taşımacılığında teknoloji türüne göre araç stoku gelişimi	97
Şekil 6.19. Yük taşımacılığında teknoloji türüne göre araç stoku gelişimi	98

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Zincir şarj sistemi	30



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
-----------------	--------------------

CO₂	Karbondioksit
GWh	Gigawatt-saat
kWh	Kilowatt-saat
Kt	Kilo ton
Mt	Milyon ton
MWh	Megawatt-saat
MJ	Megajoule
m²	Metrekare
pkm	Yolcu kilometre
tkm	Ton kilometre
TWh	Terawatt-saat
\$	Dolar

Kısaltmalar	Açıklamalar
--------------------	--------------------

AA	Anadolu Ajansı
AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AKAKDO	Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık
BEV	Bataryalı Elektrikli Araç
BUEMS	Boğaziçi Üniversitesi Enerji Modelleme Sistemi
CCS	Karbon Yakalama ve Depolama
CGE	Genel Denge Modeli
CIMS	Kanada Entegre Modelleme Sistemi
CNG	Sıkıştırılmış Doğal Gaz
ÇŞİDB	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

DICE	İklim ve Ekonominin Dinamik Entegre Modeli
EC	Avrupa Komisyonu
EEA	Avrupa Çevre Ajansı
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
ETS	Emisyon Ticaret Sistemi
ETSAP	Enerji Teknolojileri Sistemleri Analiz Programı
EUROSTAT	Avrupa İstatistik Ofisi
EU	Avrupa Birliği
EV	Elektrikli Araç
E3ME	Enerji-Çevre-Ekonomi Küresel Makro-Ekonomik
FCEV	Yakıt Hücreli Araç
GAMS	Genel Cebirsel Modelleme Sisteminde
GEM-E3	Enerji-Çevre Ekonomi Genel Denge Modeli
NEMS	Ulusal Enerji Modelleme Sistemi
GFEI	Küresel Yakıt Ekonomisi Girişimi
GHG	Sera Gazı
GREEN	Genel Denge Çevre Modeli
GSYH	Gayri Safi Yurtiçi Hasıla
HDV	Ağır Yüklü Araçlar
IAM	Entegre Değerlendirme Modelleri
ICE	İçten Yanmalı Motor
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IPA	Katılım Öncesi Yardım Aracı
LDV	Hafif Yüklü Araçlar
LEAP	Uzun Dönemli Enerji Alternatifleri Planlaması
LNG	Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
LP	Doğrusal Programlama
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
LULUCF	Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık
MAED	Enerji Talebi Analiz Modeli
MCP	Karışık Tamamlama Problemi
MIND	Yatırım ve Teknolojik Gelişim Modeli

Kısaltmalar**Açıklamalar**

MPS	Mevcut Politikalar Senaryosu
MFA	Dışışleri Bakanlığı
NEMS	Ulusal Enerji Modelleme Sistemi
NSES	Net Sıfır Emisyon Senaryosu
NIR	Ulusal Sera Gazı Envanter Raporu
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
OEM	Orijinal Ekipman Üreticileri
PHEV	Plug-in Hybrid Elektrikli Araç
PSPRD	Kamu Yolcu Taşımacılığı
PSPRV	Özel Yolcu Taşımacılığı
RICE	Bölgesel Entegre İklim ve Ekonomi Modeli
SAF	Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı
SAHS	Sürdürülebilir ve Akıllı Hareketlilik Stratejisi
STEPS	Belirtilen Politikalar Senaryosu
TESM	Türkiye Enerji Sistemi Modeli
TEP	Ton Eşdeğer Petrol
THEICCT	Uluslararası Temiz Ulaşım Konseyi
TIMES	Entegre MARKAL-EFOM Sistemi
TOB	Tarım ve Orman Bakanlığı
TUSEM	Türkiye Ulaştırma Sektörü Enerji Modeli
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UAB	Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı
UNECE	Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu
UN	Birleşmiş Milletler
UNCTAD	Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı
UNFCCC	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
PHEV	Plug-in hybrid elektrikli araç
PRIMES	Fiyat Tabanlı Piyasa Denge Sistemi
PV	Fotovoltaik
WEM	Dünya Enerji Modeli
YHT	Yeni Hızlı Tren

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan bir ülke vurgusuyla Türkiye tarafından 22 Nisan 2016 tarihinde imzalanan Paris Anlaşması, 7 Ekim 2021 tarihinde Resmi Gazete'de yayımlanarak 10 Kasım 2021 tarihinde yürürlüğe girmiştir (MFA, 2021; T.C. Resmi Gazetesi, 2021). Paris Anlaşması, 2020'den itibaren iklim değişikliği tehdidine karşı küresel sosyo/ekonomik dayanıklılığı güçlendirmeyi ve küresel sıcaklık artışını uzun vadede sanayileşme öncesi döneme kıyasla mümkün olduğunca 2°C'nin altında tutmayı amaçlamaktadır (UNFCCC, 2015a). Bu hedef, fosil yakıt kullanımının kademeli olarak azaltılmasını ve yenilenebilir enerjiye doğru bir geçişi gerekli kılmaktadır (Kejun, Chenmin, Songli, Pianpian ve Sha, 2021). Bu anlaşma uyarınca, emisyonlarını 2030 yılına kadar %41'lik bir artıştan azaltmayı taahhüt eden Türkiye'nin nihai enerji tüketimini oluşturan sektörler ve diğer sektörler için emisyon azaltma hedeflerini içeren ulusal katkı beyanlarını güncellemiş bulunmaktadır (AA, 2022). Bir sonraki aşamada yayınlanacak ulusal katkı bildirimlerinde ve yapılacak ulusal planlamalarda, Cumhurbaşkanlığı tarafından açıklanan “2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi”ne yönelik bir yol haritasının oluşturulması beklenmektedir.

İklim değişikliği en büyük çevresel, sosyal ve ekonomik tehditlerden birini teşkil etmekte olup sera gazı emisyonları bu değişikliğe neden olan en önemli etkenlerden biridir. Türkiye toplam emisyonlarının yaklaşık %70'ini oluşturan enerji kaynaklı emisyonlar, elektrik ve nihai enerji tüketimini oluşturan sektörleri sürdürülebilir kalkınma hedeflerine yönelik tüm sosyal, ekonomik ve çevresel stratejilerin ve planların temellerine yerleştirmektedir (ÇŞİDB, 2021).

İthal enerji girdilerinin Türkiye'deki toplam ithalatın yaklaşık dörtte birini oluşturması ekonomiyi küresel piyasalarda enerji arzı ve fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı daha hassas hale getirmektedir (TÜİK, 2022; Bulut ve Muratoğlu, 2018). Bu nedenle enerjide dışa bağımlılığı azaltmaya yönelik alternatif politikaların oluşturulması büyüme ve cari işlemler açığı üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Bu doğrultuda arz tarafında yerli kaynakların daha fazla kullanılması, elektrik üretimine nükleer enerjinin dahil edilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payının artırılması büyük önem taşımaktadır (Şahin ve Esen, 2022). Talep tarafında, elektrikte pik yükü daha az sapmalı hale getirmek için enerji verimliliği önlemlerinin artırılması, orta ve uzun vadeli talep tahminlerinin hazırlanması,

elektrik ve doğal gazda talep tarafı katılım piyasası altyapısının oluşturulması gibi konular ön plana çıkmaktadır (Düzgün ve Bayındır, 2020).

Dünyadaki nihai enerji tüketiminin yaklaşık beşte biri ulaştırma sektörü tarafından tüketilmektedir (EIA, 2021). Türkiye'nin nihai enerji tüketiminde ulaştırma sektörünün payı da yıllar içinde benzer dağılımlar göstermiştir. Özellikle gelişmiş ülkelerde nihai enerji tüketimindeki payı artma eğiliminde olan ulaştırma sektörü, önemli bir sera gazı (GHG) üreticisi olarak görülmektedir (Solaymani, 2019). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) Belirtilen Politikalar Senaryosunda, ulaştırma sektörünün CO₂ emisyonlarının 2030 yılına kadar %50 oranında artacağını öngörmektedir (IEA, 2021).

Sürdürülebilir orman yönetimi, ağaçlandırma, orman alanlarının artırılması, bozulmuş ormanların verimli ormanlara dönüştürülmesi, orman bakım faaliyetleri, etkin orman koruma ve orman yangını yönetimi, ormanların yutak potansiyelini artıran ve sera gazı emisyonlarını azaltan faaliyetlerdir (Marchi ve diğerleri, 2018; Werner, Taverna, Hofer, Thürig ve Kaufmann, 2010). Bu faaliyetlerin sonuçları, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne bildirilen Ulusal Sera Gazı Envanter Raporu'nun (NIR) Arazi Kullanımı, Arazi Kullanımı Değişiklikleri ve Ormancılık (AKAKDO-LULUCF) bölümünün CO₂ eşdeğeri miktarlarına yansıtılmaktadır (TÜİK, 2020). Ayrıca NIR'ın AKAKDO bölümündeki işlenmiş orman ürünleri kategorisinde çıkarılan CO₂ eşdeğeri de ormanlarla ilgili bir yutak mekanizmasıdır.

Türkiye, 2019 yılında AKAKDO kapsamında 1990 yılına göre %50 artışla 84 milyon ton (Mt) CO₂ eşdeğeri net karbon tutma gerçekleştirmiştir (UNFCCC, 2022a). Net sıfır emisyon hedefleri için belirleyici bir gösterge olacak AKAKDO emisyonları bu çalışmada belirli varsayımlarla yer almaktadır. 2019 yılında Türkiye'de 506 Mt CO₂ emisyonu gerçekleşmiştir. Bu miktarın sektörlere göre dağılımı incelendiğinde, toplam emisyonların yaklaşık %70'ini enerji kaynaklı emisyonlar oluşturmakta olup, enerji sektöründe yer alan elektrik ve ulaştırma sektörleri toplam emisyonların sırasıyla yaklaşık %30'unu ve %16'sını oluşturmaktadır. Buna göre bu çalışmada uzun vadede ulaştırma sektörü emisyonlarının toplam emisyonlar içindeki payının en fazla AB ortalamalarına (%20-25) yakınsayacağı değerlendirilmektedir. Buna göre ulaştırma sektörü emisyonlarının AKAKDO emisyonları içindeki payının da bu paylarla uyumlu olacağı varsayılmaktadır.

Türkiye'nin gelecekteki enerji politikalarını sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda oluşturmak için hangi kaynağın hangi sektörde, ne ölçüde talep edileceğinin öngörülmesi büyük önem arz etmektedir. Enerji talebi, nüfus ve ekonomi ile birlikte istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Örneğin kişi başına düşen gelir arttıkça yaşam standartları ve araç sahipliği oranı da artmakta ve bunun sonucunda ulaşım ihtiyaçları, ulaştırma kaynaklı enerji talebi ve emisyonlar da hızla artmaktadır (Yin ve diğerleri, 2015). Buna göre daha verimli ulaşım sistemleri geliştirilmesi, talep tarafında temiz enerji ihtiyacının öngörülmesi ve elektrifikasyonun artırılması ve arz tarafında temiz enerji ihtiyacının karşılanması için yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonu önemli politika çalışmaları olarak ön plana çıkmaktadır. Dolayısıyla önemli bir enerji talebi ve emisyon potansiyeline sahip olan ulaştırma sektörünün geleceğinin öngörülebilmesiyle buna yönelik geliştirilecek politikalar, ülkenin enerji, iklim ve çevre stratejilerinde önemli bir girdi oluşturacaktır.

Bir nihai ürün olarak kullanımıyla sosyoekonomik gelişmişlik göstergesi olması sebebiyle birincil enerji kaynakları ve bu kaynakların önemli bir iletim formu olan elektrik enerjisi, geçmişte olduğu gibi dünyanın geleceğinde planlama çalışmalarının en kilit unsurlarından biri olacaktır. Ancak, elektrik enerjisinin bir yönüyle nihai mal diğer yönüyle ise ara mal özelliği taşıması gibi kendine özgü bazı özellikleri onu diğer enerji türlerinden ayırmaktadır. Elektrik enerjisi, üretildiği kaynaktan alınarak iletim ve dağıtım şebekesi aracılığıyla ihtiyaç duyulan alanlara ulaştırılmaktadır. Birçok tedarik zincirini barındıran elektrik enerjisinin sürekli ve kesintisiz bir biçimde iletimi ciddi bir yatırım ve işletim maliyeti gerektirmektedir. Bu nedenle hayatın her alanında ihtiyaç duyulan ve vazgeçilmez özellikleri olan elektrik enerjisinin, üretiminden tüketimine kadar tüm aşamalarının sistemli bir mekanizma içinde işletilerek ele alınması, elektrik enerjisinin doğrudan ya da dolaylı ilişkili olduğu bütün sektörler için önem arz etmektedir.

Ulaştırma sektöründeki enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları arazi kullanımı, motor teknolojilerinin gelişimi, yakıt fiyatlandırması ve hükümet politikaları gibi birçok faktöre bağlıdır (Kapustin ve Grushevenko, 2020). Bu doğrultuda birçok AB ülkesinde çeşitli emisyon azaltım hedefleri, politikaları ve stratejileri oluşturulmaya devam etmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında, AB standartlarında belirlenebilecek ulaştırma politikalarının ve stratejilerinin Türkiye’de de uygulanması durumunda bu uygulamaların “2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi” üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi amaçlanmaktadır. Buna göre bu tez çalışmasında Türkiye Enerji Sistemi Modeli (TESM) temel alınarak Türkiye Ulaştırma

Sektörü Enerji Modeli (TUSEM) tasarlanmış, ulaştırma sektörü analiz edilmiş ve sonuçlar iki ana senaryo altında sunulmuştur:

1. Mevcut Politikalar Senaryosu (MPS): Mevcut ulaştırma sektörü politikalarını ve gelecekteki politikalar için ölçülü göstergeleri kapsamaktadır.
2. Net Sıfır Emisyon Senaryoları (NSES): Türkiye'nin net sıfır emisyon hedefine katkı sunması için AB'de uygulanan (veya gelecekte uygulanacak) düşük karbonlu ve iddialı ulaştırma sektörü politikalarını kapsamaktadır.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2, ulaştırma sektörünün tanımını ve genel görünümünü, sektördeki politika uygulamalarını ve diğeri sektörlerle ilişkisini sunmaktadır. Bölüm 3, enerji sektöründe kullanılan modellerin genel yapılarını ve çalışma konusuna ve çalışmada kullanılan modele benzer çalışmaların literatür taramasını araştırmaktadır. Bölüm 4, çalışmada kullanılan modelin genel tanıtımını ve matematiksel altyapısını belirten metodolojiyi göstermektedir. Bölüm 5, çalışmada kullanılan model için yapılan veri analizini, varsayımları ve model kalibrasyonunu sunmaktadır. Bölüm 6, modelin uygulama sonuçları ile duyarlılık ve karşılaştırma analizlerini göstermektedir. Bölüm 7, ortaya çıkan önemli sonuçları ve politika önerilerini sunmaktadır.

2. ULAŞTIRMA SEKTÖRÜ GENEL GÖRÜNÜMÜ

2.1. Genel Tanım ve Ulaştırmanın Önemi

Ulaşım, toplumların sürdürülebilir gelişimi ile bölgesel, ulusal ve uluslararası işbirliği için önemli bir etmendir. Ulaştırma sektörü, ulaşım altyapısının geliştirilmesi ve sağlanan hizmetlerin verimliliği ve kalitesi yoluyla bir bölgenin veya ülkenin küresel rekabet gücünün geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır (Prus ve Sikora, 2021). Ülkelerin ve kıtaların gelecekteki refahı, dünya ekonomisine tam ve rekabetçi bir şekilde entegre olma yeteneklerine bağlıdır. Sürdürülebilir ulaştırma sektörü, verimli ve etkili altyapı ağlarının yanı sıra ulaşımın iyi yönetim açısından bu entegrasyonun sağlanması için kritik öneme sahiptir (Legacy, Curtis ve Sturup, 2012).

Küresel gelişme ve büyüme, birbirine bağlı iyi ulaşım bağlantıları ile ulaştırma hizmetlerinin birlikte çalışabilirliğini gerektirir. Etkili ulaşım ve hareketlilik, ekonomi, eğitim ve sağlık hizmetlerinin sağlanması, tarımsal üretim ve dağıtım, enerji ve çevre dahil olmak üzere tüm sektörlerdeki ilerlemenin temel itici güçlerinden biridir (Sovacool, Kim ve Yang, 2021).

Ulaştırma sektörü, ekonomik büyüme açısından kritik öneme sahiptir. Küresel düzeyde kaynakların dağıtımı, ulusal ve uluslararası bağlantılar ile bu bağlantıların sürekliliği ve lojistiği gibi büyümeyi doğrudan etkileyen birçok değişken ulaştırma sektörü ile şekillenmektedir. Ulaştırma sektörü bir yandan yarattığı depolama, paketleme, sigorta vb. katma değeri yüksek alanlar ile bir yandan da sağladığı doğrudan istihdam ile güçlü bir ekonomik değer yaratmaktadır. Buna göre ulaştırma altyapısının iyileştirilmesi, bir yandan istihdamı, yatırımları ve üretim düzeyini, bir yandan da diğer tüm sektörlerdeki işletmelerin satış ve dağıtım fonksiyonlarını olumlu yönde etkilemektedir.

Ulaşım hizmetlerinin kalitesi insanların yaşam kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Her hane bütçesinin ortalama %13,2'si mal ve hizmetlerin taşınmasına harcanmaktadır (Cascajo, Olvera, Monzon, Plat ve Ray, 2018). Bu anlamda ulaştırma, ekonomik büyümeyi desteklemek, iş yaratmak ve insanları sağlık veya eğitim gibi temel hizmetlere bağlamak için bir gereksinimdir. Ancak bazı gelişmekte olan ülkelerde söz konusu faydalar tam olarak gerçekleştirilememektedir. Bazı istatistikler şu şekildedir (World Bank, 2023):

- Her türlü yol şartlarını barındıran alanlara en az iki km uzaklıkta yaşayan yaklaşık bir milyar insanın yaşadığı yerler, fakirliğin ön plana çıktığı erişim yoksulluğu olan yerlerdir.
- Küresel olarak her altı kadından biri, taşıma sırasında taciz edilme korkusuyla iş arayamamaktadır.
- Karayolu kazalarında her yıl 1,35 milyondan fazla kişi hayatını kaybetmekte ve bunların %93'ü gelişmekte olan ülkelerde yaşanmaktadır.

Özellikle düşük gelirli veya hassas toplumlarda sürdürülebilir ulaşım seçeneklerini genişletmek, ülkeler için insani ve sosyal gelişmeyi desteklemenin güçlü bir yoludur. Örneğin, Fas kırsalında yollara erişimler iyileştirildiğinde kızların ilkokula kaydı %17'den %54'e yükselmiştir (World Bank, 2022e). Lima'da yeni bir metro hattının devreye girmesiyle en yoksul semtlerde yaşayan insanlara 100.000 ek iş imkanı sağlanmıştır (Harvard University, 2013).

Covid-19 pandemisinden sonra Ukrayna'daki savaşın etkisi Dünya tarafından benimsenirken, gelişmekte olan ülkelerin değişen küresel koşullara ve ortaya çıkan zorluklara uyum sağlayabilmesi için ulaşım ve ticaret tedarik zincirlerinin dayanıklılığını artırmak kritik önem taşımaktadır (UN, 2022). Küresel krizler, etkin taşımacılığın önemini oldukça ortaya çıkarmıştır. Pandemi, küresel ulaşım ve ticaret tedarik zincirlerinde büyük kesintileri tetikleyerek hava ve şehir içi ulaşım işletmeciliğinin finansal uygulanabilirliğini olumsuz etkilemiştir. Ancak bu zorluklara rağmen sektör, temel çalışanları işlerine götürmede, ekonomiyi ayakta tutmada ve küresel aşı dağıtımını sağlamada etkili olmaya devam etmiştir (OECD, 2022).

Taşımacılığın enerji talebi, çeşitli yolcu ve yük taşımacılığı modları ile ilgilidir. Binek otomobiller en yaygın ulaşım modudur. Bununla birlikte Türkiye'nin 1.000 kişi başına yaklaşık 150 binek otomobil sahipliği oranı, OECD veya AB ortalaması olan 500'ün çok altındadır (Eurostat, 2023). Bu gösterge önümüzdeki yıllarda araç sahipliğindeki büyüme potansiyeline işaret etmektedir (Çizelge 2.1). Havayolu taşımacılığı sektörü, tüm dünyada neoliberal ekonomi politikalarının uygulanmaya başlamasıyla hızlı bir gelişme sürecine girmiş olup Türkiye'de de benzer gelişmeler görülmektedir. Günümüzde yaşanmakta olan pandemi süreci nedeniyle sektörün büyümesi sektöre uğramıştır ancak hızlı bir toparlanma süreci de artık yaşanmaya başlamış; havacılık yoluyla yolcu taşımacılığı da her geçen yıl hızla artmaya tekrar devam etmektedir (Aydın, 2021). Otobüsler ve minibüsler de yolcu

taşımacılığının yaygın biçimleri olup Türkiye’de bu taşıtların kullanım oranları AB ortalamalarının çok üstündedir (Çizelge 2.2). Yük taşımacılığı ise ağırlıklı olarak karayollarında gerçekleşmekte olup büyük oranda kamyonlarla yapılmaktadır. Diğer ülkelerden farklı olarak demiryolları veya yurt içi deniz taşımacılığı AB ortalamalarının oldukça gerisindedir (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.1. Bin kişiye düşen araç sayısı

Ülkeler	1990	1995	2000	2005	2011	2015	2019
AB	-	-	450	466	486	513	553
Almanya	385	494	532	559	534	548	574
İspanya	309	357	429	455	476	481	519
Fransa	404	422	460	476	540	558	571
İtalya	483	533	572	597	625	616	663
Birleşik Krallık	361	378	425	467	448	463	491
Türkiye	29	49	68	84	109	134	150

Çizelge 2.2. Yolcu kilometre içinde araç türü dağılımı

Ülkeler	Binek Araç	Toplu Taşıma	Motosiklet	Demiryolu	Havayolu	Denizyolu
AB	78,88%	6,95%	2,23%	6,10%	5,42%	0,41%
Almanya	82,41%	3,96%	1,61%	6,45%	5,29%	0,28%
İspanya	82,64%	4,86%	1,67%	7,44%	3,27%	0,11%
Fransa	79,12%	8,13%	4,22%	4,07%	4,03%	0,43%
İtalya	71,20%	5,38%	2,66%	4,49%	15,92%	0,35%
Birleşik Krallık	74,40%	4,95%	1,50%	7,90%	10,66%	0,62%
Türkiye	41,10%	54,2%	1,68%	0,92%	3,90%	0,22%

Çizelge 2.3. Ton kilometre içinde ulaştırma türü dağılımı

Ülkeler	Karayolu	Demiryolu	Denizyolu
AB	72,40%	16,08%	11,51%
Almanya	81,41%	8,85%	9,74%
İspanya	74,42%	17,15%	8,43%
Fransa	67,19%	9,27%	23,54%
İtalya	82,08%	4,11%	13,82%
Birleşik Krallık	77,21%	9,03%	13,75%
Türkiye	87,81%	4,10%	8,41%

2.2. Yolcu ve Yük Taşımacılığı

Yolcu taşımacılığı yolcuların her türlü taşıma yöntemiyle hareket ettirilmesi için yapılan hizmet türüdür. Yolcu taşımacılığı verileri taşıma modlarını kullanan yolcuların toplam hareketini ifade eder. Veriler, bir yolcunun bir kilometre boyunca taşınmasını temsil eden

yolcu-kilometre (pkm) cinsinden ifade edilir. Dikkate alınması gereken mesafe, fiili olarak koşulan mesafedir (ÇŞİDB,2022). Yük taşımacılığı yüklerin her türlü taşıma yöntemiyle hareket ettirilmesi için yapılan hizmet türüdür. Yaygın yük taşımacılığı ticari malları, emtiaları ve dökme malları içerir. Veriler, bir tonun bir kilometre boyunca taşınmasını temsil eden ton-kilometre (tkm) cinsinden ifade edilir (ÇŞİDB,2022).

Dünyada 2019 itibarıyla yaklaşık 45 trilyon pkm olan şehirlerarası yolcu taşımalarının 2050 yılında üç katına çıkabileceği; %45'e varan OECD ülkeleri payının 2050'de %25'e kadar gerileyeceği; 100 trilyon tkm düzeyindeki yük taşımalarının 2030 yılında yaklaşık 180, 2050 yılında ise 350 trilyon tkm'ye ulaşacağı öngörülmektedir (OECD, 2022).

Yolcu ve yük taşıma sistemleri, bir yerden başka bir yere taşımak için kullanılan ekipmanlar bakımından benzer olmakla birlikte, farklı yükleme ve boşaltma imkanlarına sahip oldukları için farklılıkları da bulunmaktadır. Her yolcu nereye seyahat edeceğine karar verirken, her yük çıkış noktasından varış noktasına kadar yönetilmelidir. Yolcu ve yük taşımacılığı sistemleri arasında, genellikle ayrı taşıtlar aracılığıyla ve bazen de ayrı ağlar üzerinde hareket ettikleri için temel farklılıklar vardır. Ancak, genellikle farklı konumlarda bulunan tesisler söz konusu olduğundan, farklılıklar ilgili terminallerde belirgin hale gelmektedir. Demiryolu taşımacılığı için yolcu ve yük terminalleri çok farklı konumlardadır. Havaalanları, kompleks içinde yolcu ve yük için farklı olanaklara sahiptir. Benzer bir gözlem, kruvaziyer ve feribot terminallerinin dökme yük ve konteyner terminalleri gibi diğer sadece yük tesislerinden farklı olduğu limanlar için de geçerlidir (Bruzzzone, Cavallaro ve Nocera, 2021).

Ulaştırma sektörü, ulaşım altyapısının yanı sıra insanları veya malları taşımak için hizmet veren şirketler kategorisidir. Ulaştırma sektörü, hava taşımacılığı ve lojistik, havayolları, denizcilik, karayolu ve demiryolu ve ulaşım altyapısı dahil olmak üzere çeşitli alt sektörlerden oluşmaktadır (Cedillo, Piña, Pérez ve Mora, 2022)

2.2.1. Karayolu taşımacılığı

Karayolu altyapıları, ulaşım modları arasında en düşük düzeyde fiziksel kısıtlamalara sahip olan büyük yapılardır. Bununla birlikte, nehirler veya engebeli arazi gibi özelliklerin üstesinden gelmek için önemli ek maliyetlerle yol yapımında fizyografik kısıtlamalar önemlidir. Tarihsel olarak karayolu taşımacılığı, motorsuz ulaşım biçimlerini (19. yüzyılın

sonlarında yürüme, evcil hayvanlar ve bisiklete binme) desteklemek için geliştirilmiş olsa da özellikle ulusal karayolu sistemlerinin kurulmasıyla 20. yüzyılın başından bu yana gelişiminin çoğunu motorizasyon şekillendirmiştir. Araçlar çeşitli amaçlara hizmet edebildiğinden ve nadiren yolların dışında kullanılabildiğinden, karayolu taşımacılığı ortalama bir operasyonel esnekliğe sahiptir. Karayolu taşımacılığı sistemlerinin işletme engelleri düşüktür ancak hem araçlar hem de altyapılar için yüksek bakım maliyetleri vardır. Bununla beraber özellikle yük taşımacılığı ile karayolu taşımacılığı, limanlar ve ticari hinterlandlar arasındaki yük dağıtımında çok önemli bir bağlantı haline gelmiştir.

2.2.2. Demiryolu taşımacılığı ve boru hatları

Demiryolları, üzerinde tekerlekli taşıtların bağlı olduğu bir geçiş hakkı için izlenen bir yoldan oluşur. Raylı ulaşım, kılavuzlu ray teknolojisindeki daha yeni gelişmeler olan monorayları ve maglev'i de içerir. Raylı ulaşım türleri ortalama düzeyde fiziksel kısıtlamalara sahiptir ve özellikle nakliye için düşük bir eğim gereklidir. Ağır sanayiler geleneksel olarak demiryolu taşımacılığı sistemleriyle bağlantılıdır ancak konteynerleştirme, karayolu ve deniz yolları ile bağlantısı sayesinde demiryolu taşımacılığının esnekliğini geliştirmiştir. Demiryolu, en yüksek kapasiteyi sunan kara taşımacılığı modudur ve 23.000 ton tam yüklü kömür ünitesi treni şimdiye kadar taşınan en ağır yüküdür. Bununla birlikte, göstergeler dünyanın her yerinde değişmekte ve bazı bölgelerde raylı sistemlerin entegrasyonu belli zorluklar içermektedir.

Boru hattı güzergâhları, karada veya su altında döşenebilecekleri için pratik olarak sınırsızdır. Hatlar uzun mesafelerde uygun maliyetle petrol ürünleri gibi sıvıları taşımaya amaçlarlar. 2.911 km uzunluğundaki en uzun gaz boru hattı Alberta'yı Sarnia'ya (Kanada) bağlamaktadır. En uzun petrol boru hattı, Doğu Sibirya'daki Rus arktik petrol sahalarından Batı Avrupa'ya kadar 9.344 km'den fazla uzunluğa sahip Transiberya'dır. Boru hattı yapım maliyetleri çapa göre değişmekte ve mesafe ve akışkanların viskozitesi (düşük viskoziteli gazdan yüksek viskoziteli petrole kadar) ile orantılı olarak artmaktadır.

2.2.3. Denizyolu taşımacılığı

Kaldırma kuvveti ve sınırlı sürtünme gibi fiziksel özellikleri ile deniz taşımacılığı, büyük miktarlarda yükü uzun mesafelerde taşımada en etkili modudur. Ana deniz yolları

okyanuslar, kıyılar, denizler, göller, nehirler ve kanallardan oluşmaktadır. Ancak ekonomik faaliyetlerin konumu gereği deniz sirkülasyonu, deniz sahasının belirli bölümlerinde, özellikle Kuzey Atlantik ve Kuzey Pasifik üzerinde gerçekleşir. Kanalların inşası, sürekliliği artırarak deniz sirkülasyonunu kolaylaştırmaya çalıştırsa da bu tür girişimler oldukça maliyetlidir. Liman altyapıları inşa edilmesi, bakımı ve işletilmesi en pahalı olanlar arasında olduğundan, deniz taşımacılığı yüksek terminal maliyetlerine sahiptir. Bu yüksek maliyetler, gemilerin inşası, işletilmesi ve bakımının sermaye yoğun olduğu deniz taşımacılığı ile de ilgilidir. Deniz taşımacılığı, diğer tüm modlardan daha fazla liman sahalarına bitişik çelik ve petrokimya tesisleri gibi ağır sanayilerle bağlantılıdır. Yine de konteynerleştirme ile deniz taşımacılığı, çok çeşitli mal ve emtia ticaretine izin vererek küreselleşmenin temel taşı haline gelmiştir.

2.2.4. Havayolu taşımacılığı

Havayolu taşımacılığının temel avantajı, ağ konfigürasyonunda hız ve esnekliktir. Hava yolları pratik olarak sınırsızdır ancak daha yoğundur. Uçaklar uzun bir menzile sahip olabilsen de seferlerin çoğu şehir çiftlerini 2 saatten daha az aralıklarla birbirine bağlar. Hava taşımacılığı kısıtlamaları çok boyutludur ve bunlar sahayı (bir ticari uçağın iniş ve kalkış için yaklaşık 3.300 metre piste ihtiyacı vardır), iklimi, sisi ve rüzgar akımlarını içerir. Hava faaliyetleri, insanların uzun mesafeli hareketliliğine dayanan, özellikle finans ve turizm olmak üzere üçüncül ve dördüncül sektörlerle bağlantılıdır. Daha yakın zamanlarda, hava taşımacılığı, artan miktarlarda yüksek değerli yükleri barındırmakta ve küresel lojistikte artan bir rol oynamaktadır.

2.2.5. Modlar arası taşımacılık

Modlar arası taşımacılık her bir modun ilgili avantajlarının kullanılması için kombinasyon halinde kullanılan çeşitli modlarla ilgilidir. Toplu taşıma sisteminde farklı ve birbirine bağlı modların kullanılması gibi yolcu hareketleri için “modlar arası taşımacılık” uygulansa da “modlar arası taşımacılığın” en önemli etkilerinin yük taşımacılığı üzerinde gözlemlendiği görülmektedir. Konteynerleştirme, deniz ve kara taşımacılığı sistemlerinin birbirine bağlanmasını sağlayan güçlü bir modlar arası entegrasyon vektörü olmuştur.

2.3. Ulaştırmanın Enerji ve Çevre ile İlişkisi

2.3.1. Ulaştırma ve enerji

Ulaştırma ve enerji, bir kütleye (yolcular, araçlar, kargo vb.) ivme kazandırmanın orantılı miktarda enerji gerektirdiği standart bir fizik uygulamasıdır. Burada önemli nokta bu enerjinin ne kadar etkili bir şekilde, güçlü bir modal özellik olarak pratik kullanıma aktarıldığıdır. Ulaşım ve enerji arasındaki ilişki doğrudan bir ilişkidir. Ancak her biri kendi fayda ve performans düzeyine sahip olan farklı taşıma modlarıyla ilgili olduğundan farklı yorumlara tabidir. Genellikle ekonomik kâr kapsamında hız ve enerji tüketimi arasında bir ilişki vardır. Yolcular ve yüksek değerli mallar hızlı ancak enerji yoğun modlarla taşınabilir ve bu da daha fazla enerji kullanımı gerektirir. Ağırlıklı olarak deniz taşımacılığı ile elde edilen ölçek ekonomileri, taşınan kütle birimi başına düşük enerji tüketimiyle bağlantılı ancak daha yavaş bir hızdadır. Bu durum özellikle dökme yükler için verimli yük taşımacılığı gerekliliklerine uymaktadır (Al-Enazi, Okonkwo, Bicer ve Al-Ansari, 2021). Bu anlamda söz konusu durumun tersine hava taşımacılığı ise yüksek hızlı hizmetlerle bağlantılı ancak yüksek enerji tüketim seviyelerine sahiptir (Fernández, Gundelfinger ve Coto-Millán, 2022).

Dünyadaki nihai enerji tüketiminin yaklaşık beşte biri ulaştırma sektörü tarafından tüketilmektedir (EIA, 2021). Buna paralel olarak Türkiye'nin nihai enerji tüketiminde ulaştırma sektörünün payı da yıllar içinde benzer gelişmeler göstermiştir. Çizelge 2.4'de bazı ülkeler ve Türkiye'nin yıllar itibarıyla nihai enerji tüketimi ve ulaştırma sektörünün payı gösterilmektedir. Türkiye'de ulaştırma sektörü, 2000 yılında yaklaşık 12 milyon ton eşdeğeri petrol (MTEP) enerji tüketimi ile toplam birincil enerji arzında %15 paya sahipken, 2019 yılında yaklaşık 28 MTEP enerji tüketimi ile birincil enerji arzında %20 pay elde etmiştir (Çizelge 2.4). Bu doğrultuda ulaştırma sektörü, ülkenin en önemli enerji tüketen sektörlerinden biridir. Ulaştırma sektöründe tüketilen 28 MTEP enerjinin yaklaşık %98'i petrol ürünlerinden kaynaklanmaktadır. Türkiye'nin petrol ürünleri ve petrol ürününe dönüştürülen ham petrol ithalatı incelendiğinde, söz konusu ithalatta ulaştırma sektörü kaynaklı enerji talebinin payının %70'e yaklaştığı görülmektedir (Çizelge 2.5) (ETKB, 2022).

Çizelge 2.4. Nihai enerji tüketimi ve ulaştırma sektörü (KTEP)

	2011			2015			2019		
Ülkeler	Toplam	Ulaştırma	Oran	Toplam	Ulaştırma	Oran	Toplam	Ulaştırma	Oran
AB	933.795	278.951	30%	908.986	272.465	30%	937.524	288.724	31%
Almanya	199.293	53.639	27%	200.031	55.145	28%	200.804	56.220	28%
İspanya	82.391	32.476	39%	75.946	29.439	39%	81.511	32.915	40%
Fransa	140.775	45.245	32%	140.565	45.543	32%	138.882	45.104	32%
İtalya	117.518	38.572	33%	112.108	36.374	32%	113.119	35.861	32%
Birleşik Krallık	118.840	39.908	34%	120.063	40.889	34%	121.414	41.463	34%
Türkiye	76.076	15.037	20%	86.847	24.503	28%	99.100	28.389	29%

Çizelge 2.5. Türkiye'nin ulaştırma sektörü bazında enerji denge tablosu (KTEP)

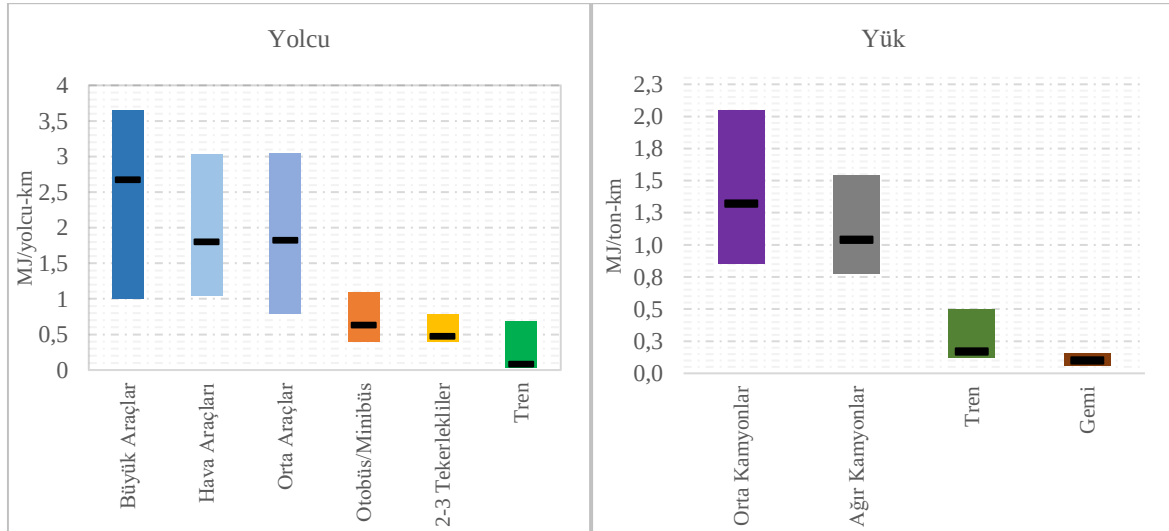
	1990			2000			2005		
Tür	Ham Petrol	Petrol Ürünleri	Kaynak Toplamı	Ham Petrol	Petrol Ürünleri	Kaynak Toplamı	Ham Petrol	Petrol Ürünleri	Kaynak Toplamı
Üretim	3.902		25.138	2.887		26.456	2.395		24.235
İthalat	23.399		30.663	32.001		55.081	35.519		70.813
Enerji Arzı	23.919		52.465	32.463		79.428	32.199		88.672
Çevrim									
Ulaştırma	8.677		8.723	11.941		12.007	13.780		13.849
Demiryolları	192		238	207		270	220		285
Denizyolları	158		158	195		195	411		411
Havayolları	311		311	1.034		1.034	1.368		1.368
Karayolları	8.015		8.015	10.505		10.508	11.781		11.785
Boru Hatları									
	2010			2015			2019		
	Ham Petrol	Petrol Ürünleri	Kaynak Toplamı	Ham Petrol	Petrol Ürünleri	Kaynak Toplamı	Ham Petrol	Petrol Ürünleri	Kaynak Toplamı
Üretim	2.621		31.558	2.641		30.936	3.135		44.821
İthalat	17.717	18.849	84.606	26.319	23.627	112.798	32.629	21.064	115.453
Enerji Arzı	19.920	9.874	105.888	28.015	11.194	129.139	35.448	5.821	144.205
Çevrim	-19.920	17.394		-28.015	26.637		-35.448	35.166	-33.556
Ulaştırma		15.992	16.314		24.375	24.936		27.038	27.687
Demiryolları		150	184		140	209		118	229
Denizyolları		541	541		189	189		396	396
Havayolları		956	956		1.405	1.405		1.174	1.174
Karayolları		14.345	14.416		22.641	22.833		25.350	25.605
Boru Hatları			218			300			283

Ulaştırma sektöründe enerji tüketimi çeşitli ulaşım türlerinde gerçekleşmektedir. Bunlar şu şekildedir:

- Kara taşımacılığı enerji tüketiminin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Tek başına karayolu taşımacılığı, gelişmiş ekonomilerde ulaştırma sektöründe tüketilen enerjinin %80'ini oluşturmaktadır (Lin, Qin, Wu ve Xu, 2021). Karayolu taşımacılığı son 25 yıldaki ek enerji talebinden sorumlu olan neredeyse tek ulaşım türüdür (Eurostat, 2023).
- Düşen pazar payına rağmen, 1 kg petrol eşdeğeri temelinde demiryolu taşımacılığı, karayolu taşımacılığına göre yolcu için dört kat ve yük taşımacılığı için iki kat daha

verimli olmaya devam etmektedir. Demiryolu taşımacılığı, küresel ulaştırma sektörü enerji talebinin %6'sını oluşturmaktadır (Eurostat, 2023).

- Denizyolu taşımacılığı, hacimle ölçüldüğünde sınır ötesi dünya ticaretinin %90'ını oluşturmaktadır (UNCTAD, 2022). Denizyolu taşımacılığının doğası ve ölçek ekonomisi gereği taşımacılık faaliyetleri tarafından tüketilen tüm enerjinin yalnızca %6'sını kullandığından, malların hareketliliğine katkısının çok altında bir rakam olarak onu en enerji verimli mod haline getirmektedir (Eurostat, 2023). Yine de yakıt tüketimi, gemi tasarımı (hidrodinamik), kullanım seviyesi, operasyonel hız, boşta kalma süresi (limanlarda bekleme) ve hatta hava koşulları deniz taşımacılığında önemli bir girdilerdir. Terminal operasyonları için rakamlar farklılık göstermekle beraber bir konteyner terminali enerjinin %60-70'ini fosil yakıtlardan (ör. yük ekipmanı) ve %30-40'ını elektrikten (ör. taşıyıcılar) sağlamaktadır (UNCTAD, 2022).
- Havayolu taşımacılığı ulaşım ağlarının küreselleşmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Havacılık sektörü ulaştırma sektöründe tüketilen enerjinin %8'ini oluşturmaktadır (Eurostat, 2023). Hava taşımacılığı, yüksek hızlara bağlı olarak yüksek enerji tüketim seviyelerine sahiptir. Daha verimli motorlar ve daha iyi aerodinamik gibi teknolojik yenilikler, her yeni nesil uçağın enerji verimliliğinin sürekli olarak iyileştirilmesine yol açmıştır (Şekil 2.1) (Salvucci ve Tattini, 2019).



Şekil 2.1. Farklı Ulaşım Modlarının Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması

Ulaşımındaki enerji tüketimi açısından yolcu ve yükün hareketliliği arasında daha fazla ayrım yapılabilmektedir. Yolcu taşımacılığı, ulaşım faaliyetlerinden elde edilen enerjinin yaklaşık %55'ini oluşturmaktadır (Eurostat, 2023). Özel otomobiller yolcu taşımacılığında

baskın moddur. Ancak bu modda önemli verimlilik iyileştirmeleri görülmesine rağmen, enerji verimliliğine göre zayıf performanslara sahiptir. Bir arabanın kullandığı yakıtın yalnızca %12 ile %30'u, aracın türüne bağlı olarak ivme sağlamaktadır (EPA, 2022). Artan gelir, otomobil sahipliği ve araçların kat ettiği mesafe arasında yakın bir ilişki vardır. ABD, her iki kişiye bir araba ile dünyadaki en yüksek araba sahiplilik oranına sahip ülkelerden biridir (Eurostat, 2023b). Yük taşımacılığı ulaşım faaliyetlerinden elde edilen enerji tüketiminin yaklaşık %45'ini oluşturmaktadır. Enerji tüketiminde, iç tüketimin %80'ini oluşturan karayolu taşımacılığı hakimdir (Eurostat, 2023). Enerji açısından en verimli iki mod olan demiryolu ve denizyolu taşımacılığı, daha marjinal tüketim seviyelerine sahiptir. Kıyı ve iç denizyolu da yolcu ve yüklerin taşınmasında enerji açısından verimli bir yöntem sağlamaktadır. Bu enerji avantajları nedeniyle, kısa denizyolu taşımacılığı bir ulaşım alternatifi ve geniş kıyı şeridinde sahip ülkelerin ulusal ulaşım politikalarının bir parçası olarak değerlendirilmektedir (Schnurr ve Walker, 2019).

2.3.2. Ulaştırma ve çevre

Ulaştırma sektörü AB'deki nihai enerji tüketiminin üçte birini oluşturmakta olup bu tüketimin büyük kısmı petrolden kaynaklanmaktadır. Bu durum ulaştırma sektörünü AB'nin iklim koruma hedeflerini gerçekleştirmenin önünde büyük bir engel haline getirmekte ve politikaların ana eksenini oluşturmaktadır. Enerji üretimi ve sanayi gibi diğer birçok ekonomik sektör 1990'dan beri emisyonlarını azaltırken, ulaştırma sektöründen kaynaklanan emisyonlar artmaktadır. Bu yüzden ulaştırma sektörü mevcutta AB'nin toplam sera gazı emisyonlarının dörtte birinden fazlasını oluşturmaktadır (Çizelge 2.6), (Eurostat, 2022a). Arabalar, kamyonetler, kamyonlar ve otobüsler, ulaşımdan kaynaklanan toplam sera gazı emisyonlarının %70'inden fazlasına sebep olurken geriye kalanını ise ağırlıklı olarak denizcilik ve havacılık faaliyetleri oluşturmaktadır (Çizelge 2.7) (Eurostat, 2023).

Çizelge 2.6. Ülkeler bazında toplam emisyonlar ve ulaştırma sektörünün payı (bin ton)

Ülkeler	2011			2015			2019		
	Toplam	Ulaştırma	Pay	Toplam	Ulaştırma	Pay	Toplam	Ulaştırma	Pay
AB	4.066.949	808.345	20%	3.815.668	794.545	21%	3.601.584	834.682	23%
Almanya	911.244	156.095	17%	897.954	162.967	18%	799.734	165.284	21%
İspanya	357.852	86.788	24%	337.416	83.820	25%	313.828	91.625	29%
Fransa	483.264	134.695	28%	457.924	133.744	29%	434.540	131.725	30%
İtalya	505.141	114.460	23%	441.759	106.069	24%	418.352	105.322	25%
Birleşik Krallık	560.266	118.889	21%	505.246	121.043	24%	444.230	119.911	27%
Türkiye	428.492	47.386	11%	474.470	75.798	16%	506.078	82.428	16%

Çizelge 2.7. Ulaştırma sektörü bazında ülkelerin emisyonlarının ulaştırma türü dağılımları

Kt CO ₂													
2019							2015						
Dğer	Deniz	Demir	Kara	Hava	Toplam		Dğer	Deniz	Demir	Kara	Hava	Toplam	
6.412	22.505	5.997	904.806	16.772	956.493		6.058	19.807	6.488	870.053	14.949	917.355	
1.210	1.582	834	159.404	2.254	165.284		1.248	1.673	1.025	157.023	1.999	162.967	
131	3.317	246	84.777	3.154	91.625		108	1.355	245	79.604	2.508	83.820	
464	1.333	371	124.537	5.021	131.726		428	1.331	419	127.169	4.397	133.744	
689	4.391	151	97.690	2.400	105.322		566	3.794	77	99.446	2.186	106.069	
603	5.564	1.851	110.441	1.452	119.911		512	5.610	1.929	111.363	1.630	121.043	
582	1.217	400	76.720	3.509	82.428		656	1.147	480	69.309	4.205	75.798	
%													
2019							2015						
Dğer	Deniz	Demir	Kara	Hava	Toplam		Dğer	Deniz	Demir	Kara	Hava	Toplam	
0,70%	2,40%	0,60%	94,60%	1,80%	100,00%		0,70%	2,20%	0,70%	94,80%	1,60%	100,00%	
0,70%	1,00%	0,50%	96,40%	1,40%	100,00%		0,80%	1,00%	0,60%	96,40%	1,20%	100,00%	
0,10%	3,60%	0,30%	92,50%	3,40%	100,00%		0,10%	1,60%	0,30%	95,00%	3,00%	100,00%	
0,40%	1,00%	0,30%	94,50%	3,80%	100,00%		0,30%	1,00%	0,30%	95,10%	3,30%	100,00%	
0,70%	4,20%	0,10%	92,80%	2,30%	100,00%		0,50%	3,60%	0,10%	93,80%	2,10%	100,00%	
0,50%	4,60%	1,50%	92,10%	1,20%	100,00%		0,40%	4,60%	1,60%	92,00%	1,30%	100,00%	
0,70%	1,50%	0,50%	93,10%	4,30%	100,00%		0,90%	1,50%	0,60%	91,40%	5,50%	100,00%	
							0,80%	4,70%	1,10%	86,30%	7,10%	100,00%	

Ulaşım, özellikle şehirlerde önemli bir hava kirliliği kaynağı olmaya devam etmektedir. Partikül madde ve nitrojen dioksit (NO₂) gibi hava kirleticiler insan sağlığına ve çevreye zarar vermektedir. Son on yılda ulaşımdan kaynaklanan hava kirliliği, yakıt kalite standartlarının getirilmesi, EU araç emisyon standartlarının uygulanması ve daha temiz teknolojilerin kullanılması nedeniyle azalmış olsa da hava kirleticisi konsantrasyonları hala çok yüksektir (UNECE, 2021).

Gürültü kirliliği, ulaşım ile bağlantılı bir başka önemli çevre sağlığı sorunudur. Avrupa Çevre Ajansı (EEA)'na üye ülkelerde 100 milyondan fazla insanın zararlı gürültü seviyelerinden etkilenmektedir. Karayolu trafiği en yaygın gürültü kaynağı olup hava trafiği ve demiryolları da önemli gürültü kaynaklarıdır (EEA, 2021).

Ulaşım altyapısı, doğal alanları hayvanlar ve bitkiler için ciddi sonuçlar doğuracak şekilde küçük parçalara ayırdığı için peyzaj üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir. Özellikle gelişmiş ülkelerde nihai enerji tüketimindeki payı artma eğiliminde olan ulaştırma sektörü, önemli bir sera gazı (GHG) üreticisi olarak görülmektedir (Solaymani, 2019). AB-28 ülkelerinin durumu göz önüne alındığında, 2020 yılında AB-28'deki toplam sera gazının yaklaşık %20'si uluslararası havacılık ve deniz emisyonları hariç ulaştırma sektörü kaynaklıdır (Eurostat, 2022a). IEA Dünya Enerji STEPS'de bu sektörün CO₂ emisyonlarının 2030 yılına kadar %50 oranında artacağını öngörmektedir (IEA, 2021). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) sera gazı envanter verilerine göre, 2019 yılında Türkiye'nin toplam sera gazı CO₂ eşdeğeri 506 Mt olup, bunun 82,4 Mt'ü ulaştırma sektöründen kaynaklanan emisyonlardır. Ulaştırma sektörü ile ilgili emisyonların toplam sera gazı içindeki payı 1990 yılında %12,8 iken, 2019 yılında bu oran %16,2 olmuştur. TÜİK 2019 sera gazı envanter verilerine göre ulaşımdan kaynaklanan CO₂ emisyonlarının dağılımı sırasıyla karayolunda %93,1, havada %4,2, denizde %1,4, demiryollarında %0,4 ve diğer ulaşım modlarında %0,7'dir. (TÜİK, 2022).

Ulaştırma sektörünün iklim üzerindeki etkisini azaltmak için önemli ihtiyaçlar ortaya çıkmaktadır. Yurtiçi ve uluslararası taşımacılık hâlihazırda küresel sera gazı emisyonlarının %20'sine katkıda bulunduğu için mevcut şartlarda, ekonomik gelişmelerle beraber nüfusun ve hareketlilik ihtiyacının artması, ulaştırma sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarını 2050 yılına kadar %60'a kadar artmasına neden olabilecektir (IEA, 2021a).

Ulaşım söz konusu olduğunda, gelişmekte olan ülkeler ikili bir zorlukla karşı karşıya kalmaktadır. Bunlar herkesin verimli, güvenli ve uygun fiyatlı mobiliteye erişimini sağlamak ve bunu çok daha küçük bir iklim ayak izi ile yapmaktır (World Bank, 2023). Yüksek kaliteli toplu taşıma, iyi bağlantılı şehirler, motorsuz ulaşım seçenekleri ve daha temiz teknolojiler gibi çözümlere yönelik iddialı yatırımlar, aynı anda kalkınma ilerlemesine ve iklim hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olmaktadır. Bu anlamda ulaştırma sektörünü iklim sürdürülebilirliğine taşımak için şu yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır (Hepburn ve diğerleri, 2021):

- Daha temiz ulaşım çözümlerine geçmek
- Ulaşım altyapısının ve hizmetlerinin verimliliğini artırmak
- Esnekliği artırmak için taşıma sistemlerini güçlendirmek

Ulaştırma ve lojistik sektörlerini de yakından ilgilendiren Avrupa Yeşil Mutabakatı Avrupa Komisyonu tarafından 2019 yılının sonunda açıklandı. Mutabakat kapsamında ve ulaştırma sektörü özelinde hazırlanan “Etkin ve Yeşil Hareketlilik” adlı yeni bir mevzuat paketi teklifi 14 Aralık 2021 tarihinde yayımlandı. Söz konusu paket 2020 Aralık ayında kabul edilen “Sürdürülebilir ve Akıllı Hareketlilik Stratejisi (SAHS)”, ardından Temmuz 2021 tarihinde yasalaştırılan “Fit for 55” adlı mevzuat paketinden sonraki ikinci mevzuat paketi önerisidir. Paket ile ulaştırma sektöründe modlar arası bağlantının artırılması, taşımacılığın demiryolu ve iç su yollarına kaydırılması, çok modlu taşımacılığın daha verimli kullanılması, yeni şarj noktalarının kullanıma sunulması, yeni dijital teknolojilerin devreye sokulması, sürdürülebilir kentsel hareketliliğe daha fazla öncelik verilmesi ve ulaştırma sektöründe 2050 yılına kadar sektör emisyonlarının 1990 seviyelerine kıyasla %90 oranında azaltılması amaçlanmaktadır (EC, 2021). Bu kapsamda Avrupa Birliği 2030'a kadar emisyonların 1990 seviyelerinin %55 altına çekilmesini; 2050 yılında ise sıfır karbon emisyonu hedefi ile kıtanın karbon-nötr bir alan olmasını amaçlamaktadır (EC, 2021a; EC, 2021b). Yaşanan gelişmelerden Yeşil Mutabakatın Avrupa kıtası ile sınırlı kalmayacağını, doğası gereği küresel bir sorun olan iklim değişikliğine yönelik atılacak adımlarda AB'nin ticari ortakları ve komşularını da bu planda öngörülen tedbirlerden doğrudan doğruya etkileyeceği öngörülmektedir. Bu doğrultuda etkilenecek sektörlerden birisi olan ve sera gazı emisyonunda önemli paya sahip ulaştırma sektöründe 2030 yılına kadar elektrifikasyon, gelişmiş biyoyakıtlar veya diğer sürdürülebilir alternatifler gibi yenilenebilir ve düşük

karbonlu yakıtların kullanımı yoluyla yenilenebilir enerji payının yaklaşık %24'e çıkarılması gerekmektedir (TE, 2021).

Sürdürülebilir orman yönetimi, ağaçlandırma, orman alanlarının artırılması, bozulmuş ormanların verimli ormanlara dönüştürülmesi, orman bakım faaliyetleri, etkin orman koruma ve orman yangını yönetimi, ormanların yutak potansiyelini artıran ve sera gazlarını azaltan faaliyetlerdir (Marchi ve diğerleri, 2018; Werner, Taverna, Hofer, Thürig ve Kaufmann, 2010). Bu faaliyetlerin sonuçları, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne (TOB,2020) bildirilen Ulusal Sera Gazı Envanter Raporu'nun (NIR) AKAKDO bölümünün CO₂ miktarlarına yansıtılmaktadır. Ek olarak, NIR'in AKAKDO bölümündeki işlenmiş orman ürünleri kategorisinde çıkarılan CO₂ de ormanla ilgili bir yutak mekanizmasıdır. Türkiye, 2019 yılında AKAKDO kapsamında 1990 yılına göre yüzde 50 artışla 84 Mt CO₂ eşdeğeri net karbon tutma gerçekleştirmiştir (UNFCCC, 2022a). Bu anlamda yutak alanlarındaki gelişmeler, belirlenecek politikalar ve bunların sonuçları enerji ve toplam emisyonların azaltım politikalarını ve doğal olarak Türkiye'nin net sıfır emisyon hedefini doğrudan etkilemektedir.

2.3.3. Ulaştırma sektöründe temiz enerji teknolojileri ve elektrifikasyon

Ulaştırma, tüm sektörler arasında fosil yakıtlara en bağımlı sektördür ve dünyada 2021'de son kullanım sektörlerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının %30'dan fazlasını oluşturmaktadır (Eurostat, 2023). Covid-19 salgınından en çok etkilenen ulaştırma sektöründe talep arttıkça ve alternatif yakıtların kullanımı sınırlı kaldıkça emisyonlar yeniden artmaya başlamıştır. Bu artış en çok gelişmekte olan ekonomilerde dikkat çekmektedir. Net sıfır emisyon politikalarının her geçen gün benimsenmesiyle, en az karbon yoğun seyahat seçeneklerine geçişlerin ve alternatif temiz yakıtların teşvik edilmesi ve tüm ulaşım modlarının karbon yoğunluğunu azaltmak için operasyonel ve teknik enerji verimliliği önlemleri, ulaştırma sektöründe temel politikaları oluşturmaktadır.

Pandemi kısıtlamalarının kaldırılması sonucunda yolcu ve yük hareketliliğinin artmasıyla 2021'de ulaştırma sektöründen kaynaklanan küresel CO₂ emisyonları %8 artarak yaklaşık 7,7 Gt CO₂'ye yükselmiştir. IEA'nın net sıfır senaryosuna göre ulaştırma talebinde beklenen büyümeyle sektör emisyonlarının 2030 yılına kadar yaklaşık %20 oranında azalarak 6 Gt'nin altına düşmesi gerekmektedir (IEA, 2021b). Bu düşüşün sağlanması, karayolu taşıtlarının

hızlı bir şekilde elektrifikasyonuna, operasyonel ve teknik enerji verimliliği önlemlerine, özellikle denizcilik ve havacılık alt sektörlerinde düşük karbonlu yakıtların ticarileştirilmesine ve ölçeklerinin büyütülmesine ve karbon yoğun seyahat seçeneklerinde modal geçişi teşvik eden politikalara bağlı olacaktır.

Alternatif yakıtlar, fosil yakıtların yenilenemeyen karakteri ve zararlı kirletici emisyonları azaltma ihtiyacı nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Dikkate alınan en yaygın alternatifler şunlardır:

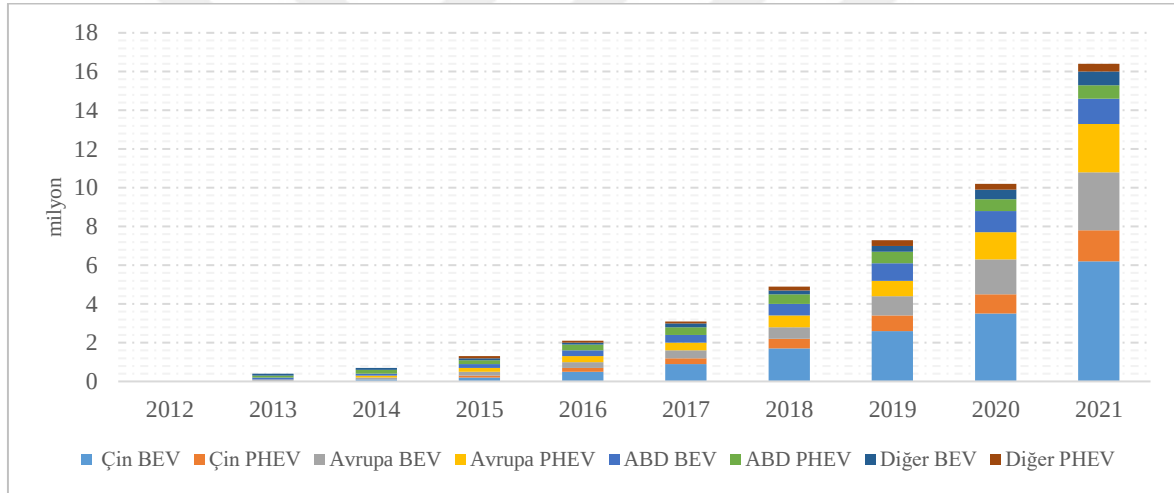
- a) Etanol, metanol ve biyodizel gibi biyoyakıtlar gıda mahsullerinin (şeker kamışı, mısır, tahıllar vb.) veya biyokütlenin (odun, ot vb.) fermantasyonundan üretilmektedir. Ancak bunların üretimi, diğer arazi kullanım türleriyle rekabet edebilecek geniş hasat alanları gerektirmektedir. Bu alan, bitkilerin güneş enerjisini emme ve fotosentez yoluyla dönüştürme kapasitesiyle ilgilidir. Biyokütlenin bu düşük üretkenliği, ulaştırma sektörünün enerji ihtiyacını tam olarak karşılamaya yetmemektedir. Biyokütle yakıt seçimi, büyük ölçüde üretim sürecinin sürdürülebilirliğine ve enerji verimliliğine bağlı olmaktadır (Mahapatra, Kumar, Singh ve Sachan, 2021).
- b) Doğal gaz, ulaştırma sektörü için verimli ve çevresel olarak sürdürülebilir bir yakıt türüdür. 20. yüzyılın başlarından itibaren ulaşım yakıtı olarak kullanılmasına rağmen, 20. yüzyılın sonlarına kadar doğal gaz kullanımı marjinal seviyelerde kalmıştır. Doğal gaz, toplu taşıma otobüsleri veya teslimat kamyonları (kamyonet) gibi yoğun şekilde seyahat eden büyük araç filoları için daha uygundur (Oxford, 2019).
- c) Hibrit ve Plug-in Hibrit araçlar elektrik verimliliğini içten yanmalı bir motorun uzun sürüş menziliyle birleştiren fırsatlar sağlayan, bir elektrik motoru ve bataryalarla desteklenen kısmen içten yanmalı motor kullanan güç sistemlerinde oluşmaktadır. Bir hibrit veya plug-in hibrit araçlar birincil enerji kaynağı olarak hem elektrik hem de sıvı yakıt kullanabilir. Elektrikli motor, aracı hareket ettirmek ve belli bir süre sürmek için güç sağlamakta veya bir jeneratör aracılığıyla aküyü şarj etmek için kullanılmaktadır. Alternatif olarak güç, batarya tarafından üretilen elektrikle sağlanabilir. Batarya boşaldığında, sürücünün müdahalesi olmadan içten yanmalı motor otomatik olarak çalışmaktadır. Jeneratör, bataryayı yeniden şarj etmek için fren enerjisi kullanılarak da beslenebilir. Böyle bir güç tasarımı, özellikle bir aracın sık sık hızlandığı ve fren yaptığı kentsel alanlarda genel yakıt verimliliğine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Hibrit veya plug-in hibrit araçların başarılı bir şekilde geliştirilmesi ve ticarileştirilmesi, tam

elektrikli araçlara geçiş sürecinde kısa ve orta vadede geleneksel ICE'li araçlara göre çevre dostu olmalarından dolayı en sürdürülebilir seçenek olarak görünmektedir (Anselma, 2022).

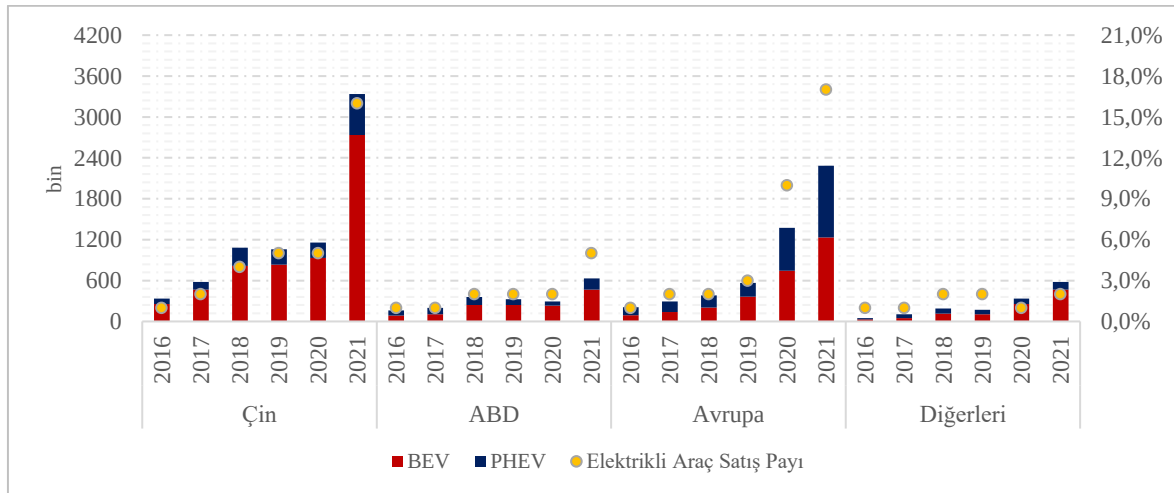
d) Hidrojen günümüzde geleceğin enerji kaynağı olarak görülmektedir. Hidrojeni bir ulaştırma yakıtı olarak kullanmanın adımları, suyun elektrolizi veya hidrokarbonlardan çıkarılması; daha sonra hidrojenin sıkıştırılması veya sıvı forma dönüştürülmesi ve depolanması; son olarak bir motorlu taşıtı itmek için hidrojenden talep üzerine elektrik üretmek için bir yakıt hücresi kullanılmasıdır (Wickham, Hawkes ve Jalil-Vega, 2022). Hidrojen yakıt hücreleri, benzine göre enerji açısından daha verimlidir ve sıfıra yakın emisyon yaymaktadır. Ancak hidrojenin, özellikle üretiminde, transferinde ve depolanmasında çok fazla enerji boşa harcanabileceği için çeşitli problemler ortaya çıkmaktadır. Bunlardan biri hidrojen üretimi için elektrik üretimi gerekmektedir. Elektrik üretimi temiz enerji çerçevesinde ağırlıklı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi gerektiği için önemli bir rüzgar ve güneş enerjisi potansiyeli gerektirmektedir. Bunun yanında bu yolla üretilen elektriği hidrojene çevirecek elektrolizör kapasiteye ve ilk yatırım maliyetlerini dikkate alarak Power to X santrallerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, hidrojeni depolamak için bir araca ağırlık ve hacim katan düşük sıcaklık /yüksek basınçlı depolama tankları gerekmektedir (IEA, 2021c).

e) Elektrik, enerji kaynağı olarak petrol yakıtlarına alternatif olarak değerlendirilmektedir. Tamamen bataryalı bir elektrikli araç, hidrojen yakıtı ile çalışan bir araca göre daha verimli bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Bataryada depolanan elektrik, elektrik motoruna güç sağlayabileceğinden, enerjiyi elektriğe dönüştürmeye gerek yoktur. Ayrıca, tamamen elektrikli bir otomobilin üretimi, benzer bir yakıt hücreli araca göre daha kolay ve daha ucuzdur. Elektrikli araçların geliştirilmesinin önündeki ana engeller, ICE araçlara göre sürüş menzillerinin düşük ve yakıt dolum sürelerinin daha uzun olmalarıdır. Bataryaların düşük enerji kapasitesi, elektrikli arabayı benzin vb. kullanan içten yanmalı motorlara göre daha az rekabetçi hale getirmektedir (Ghosh, 2020). Ancak elektrikli araçlar düşük mesafeler nedeniyle hem yolcu hem de yük taşımacılığında şehir içi ulaşım için son derece uygun olmakla beraber teknolojik gelişmelerle paralel olarak giderek uzun mesafelerde de kullanımı artmaktadır. Bununla birlikte teknoloji geliştikçe, bataryaların enerji ve maliyet etkinliği de iyileşmektedir (Amry, Elbouchikhi, Gall, Ghogho ve Hani, 2022). Örneğin, 2010 ile 2015 arasında lityum iyon pillerin maliyeti % 65 düşmüştür (Fool, 2016).

Elektrikli otomobil satışları, yarı iletken çip kıtlığı da dahil olmak üzere Covid-19 salgını ve tedarik zinciri zorluklarına rağmen 2021'de rekor seviyeye ulaşmıştır. 2012'de dünya çapında yaklaşık 120.000 elektrikli otomobil satılırken 2021'de bu miktar sadece ortalama haftalık satış miktarıdır. 2020'de durgun otomobil pazarına rağmen elektrikli araç satışları (bataryalı elektrikli araçlar (BEV'ler) ve şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar (PHEV'ler)) yıllık bazda neredeyse iki katına çıkarak 2021'de 6,6 milyona ulaşmış ve dünyada yollardaki elektrikli araç sayısı 16,5 milyonun üzerine çıkmıştır (Şekil 2.2). Önceki yıllarda olduğu gibi BEV'ler artışın çoğunu (yaklaşık %70) oluşturmuştur. Çin ve Avrupa birlikte söz konusu küresel elektrikli otomobil satışlarının %85'inden fazlasını oluşturmuş olup ardından ABD 2020 yılına göre 2 kat artarak 630.000 ile %10'luk piyasayı elde etmiştir (Şekil 2.3) (IEA,2022).

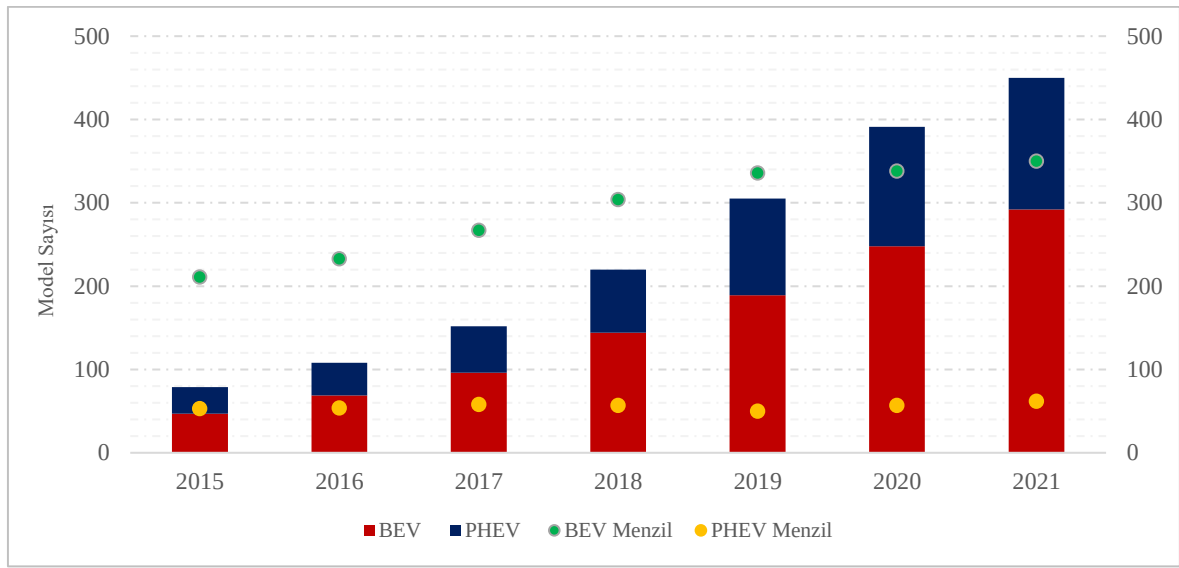


Şekil 2.2. Bazı ülkelerde ve bölgelerde yıllar itibarıyla elektrikli araç sayısı

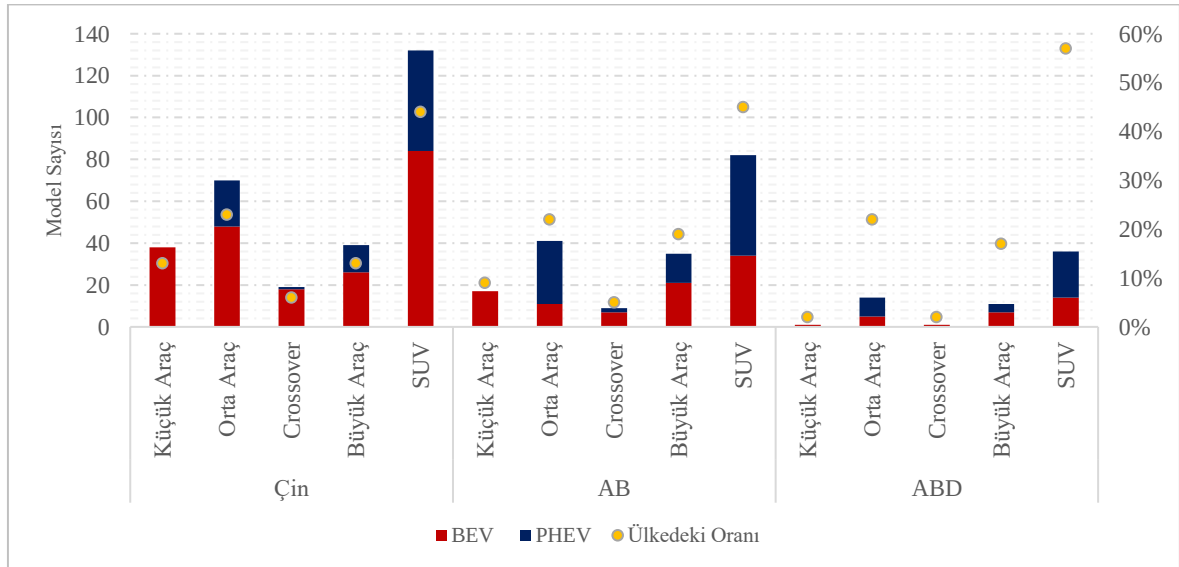


Şekil 2.3. Bazı ülkelerde ve bölgelerde yıllar itibarıyla elektrikli araç satışı ve oranları

EV'lerin başarısı birçok faktör tarafından yönlendirilmektedir. Sürdürülebilir politika desteği bu faktörlerin başında gelmektedir. EV'lere yönelik sübvansiyonlar ve teşvikler için yapılan kamu harcamaları 2021'de neredeyse ikiye katlanarak yaklaşık 30 milyar \$'a ulaşmıştır. Aynı zamanda artan sayıda ülke içten yanmalı motorları kademeli olarak kullanımdan kaldırma sözü vermiş veya önümüzdeki on yıllar için iddialı araç elektrifikasyonu hedeflerini açıklamıştır. 450 adet ile 2021'de 2015'e göre beş kat daha fazla yeni EV modelinin piyasada var olması tüketiciler için çekiciliği artırmaktadır (Şekil 2.4 ve Şekil 2.5) (IEA, 2022).

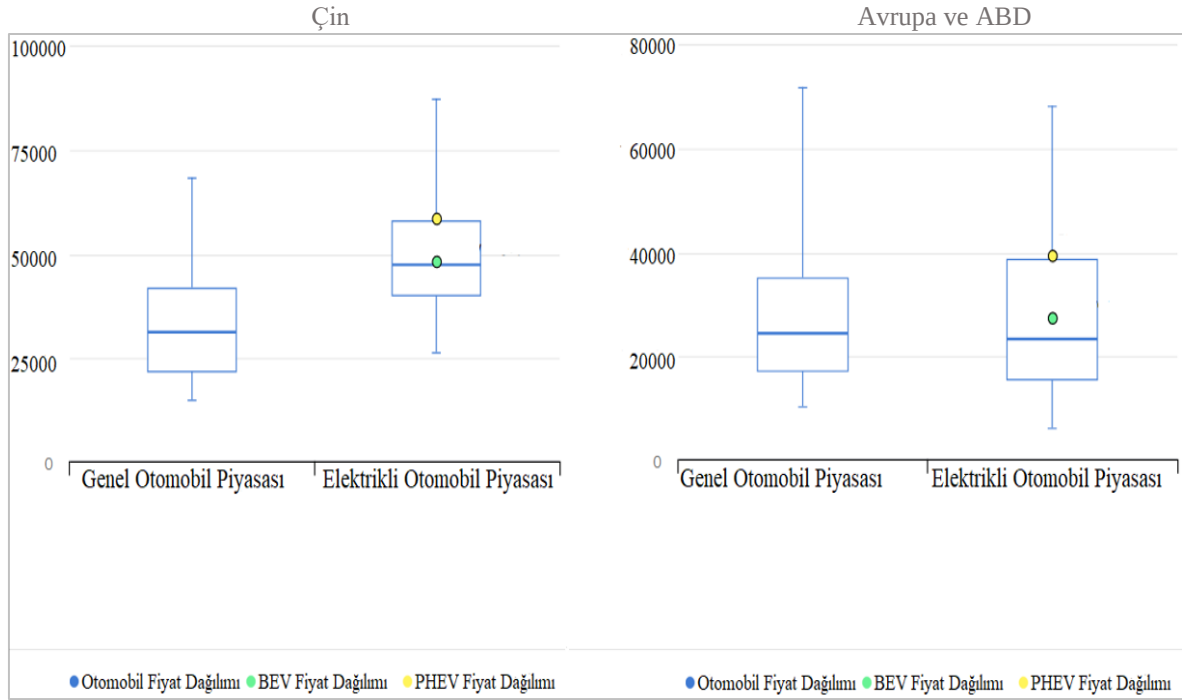


Şekil 2.4. Dünyada elektrikli araç model sayısı ve ortalama menzilleri



Şekil 2.5. Bazı ülkelerde ve bölgelerde elektrikli araçların boyutuna göre model sayıları

Elektrikli ve ICE'e sahip otomobiller arasındaki fiyat farkı açısından bölgesel farklılıklar bulunmaktadır. Elektrikli modellerin ortalama olarak daha küçük ve daha ucuz olduğu Çin'de, fiyat farkı diğer büyük piyasalara göre daha dardır. BEV'lerin Çin'deki satış ağırlıklı medyan fiyatı genel otomobil pazarından yalnızca %9 daha yüksektir ve BEV'lerin ortalama fiyatı ICE araçlara göre %20 daha pahalıdır. Bu oranlar Avrupa'da ve ABD'de yaklaşık %45'dir (Şekil 2.6) (IEA,2022).

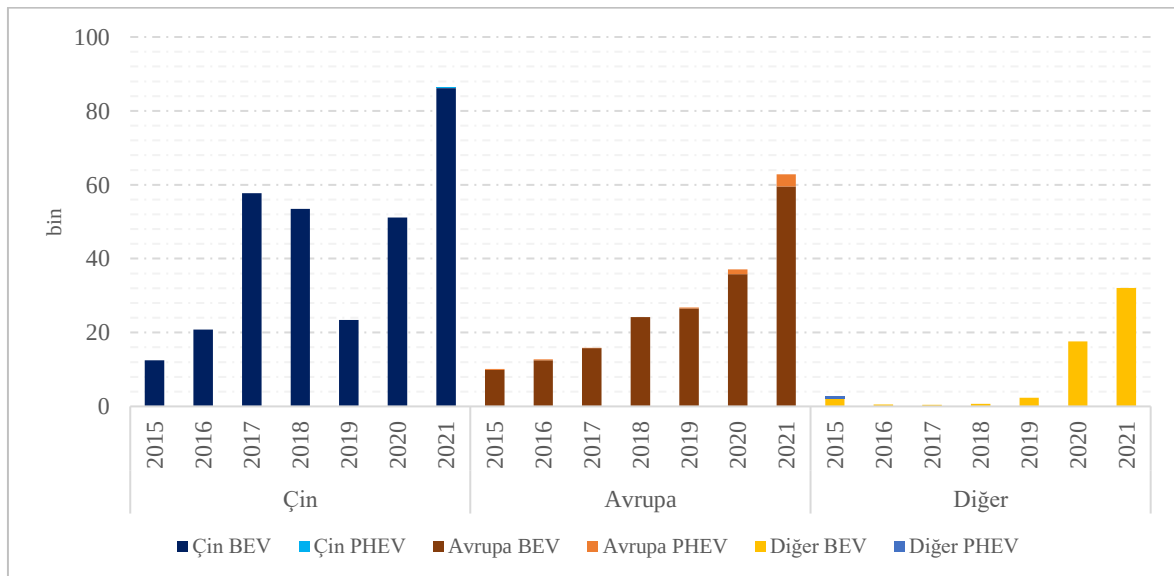


Şekil 2.6. Avrupa'da ve Çin'de elektrikli araçların fiyat dağılımı

Covid-19 salgını ve Rusya-Ukrayna savaşı, küresel tedarik zincirlerini ve otomobil endüstrisini büyük ölçüde etkilemiştir. Yakın gelecekte, müşterilere EV teslimatındaki gecikmeler bazı pazarlarda satış artışını azaltabilecektir. Ancak uzun vadede hükümetlerin ve şirketlerin ulaşımda elektrifikasyona yönelik çabaları, EV satışlarında daha fazla büyüme imkanı sağlamaktadır. Mevcut iklim odaklı politika taahhütlerine ve duyurularına dayanan IEA Belirtilen Politikalar Senaryosunda (STEPS), EV'lerin 2030'da tüm modlarda (iki ve üç tekerlekli araçlar hariç) dünya çapında satılan araçların %30'undan fazlasını temsil edeceği öngörülmektedir. Ancak bu oran önemli bir artışı işaret etse de 2050 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşacak bir gidişata uyum sağlamak için 2030 yılına kadar ihtiyaç duyulan %60'lık oranın oldukça altındadır. IEA'nın STEPS'ye yansıyan mevcut politika planlarına göre EV'ler 2030'da satışların %20'sinden biraz fazlasına ulaşarak toplam stoku bugünün yaklaşık 11 katı olan 200 milyona çıkacağı öngörülmektedir (IEA, 2022).

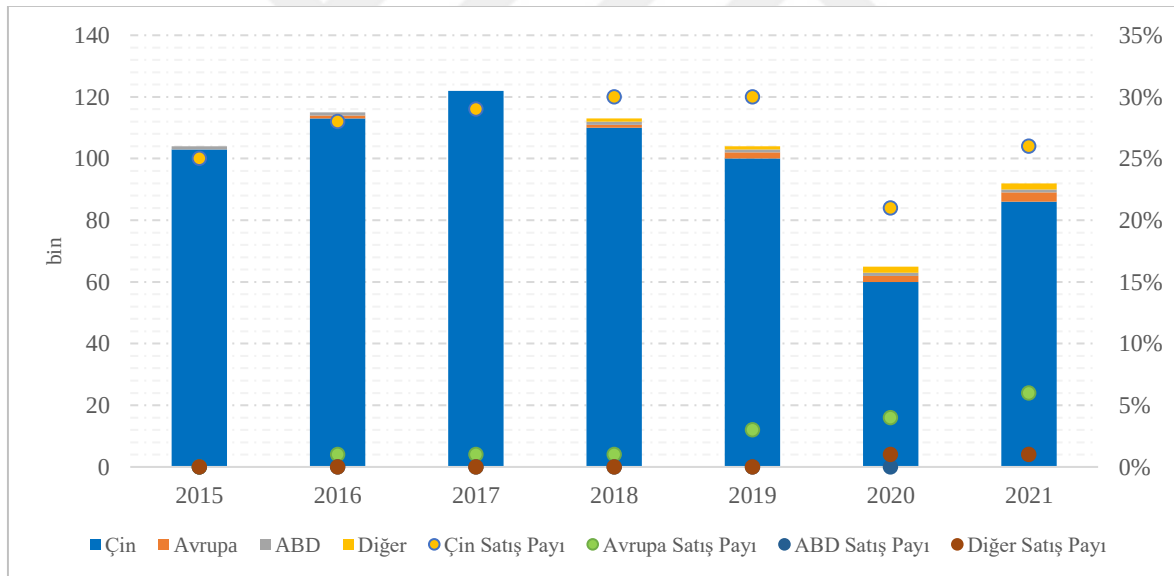
EV şarj altyapısı için elektriğin küresel piyasa değerinin STEPS'de 20 kattan fazla büyüyerek 2030'a kadar yaklaşık 190 milyar \$'a ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bu da bugünün ICE piyasa değerinin yaklaşık onda birine denk gelmektedir. Yine de açıklanan kamuya açık şarj altyapısı miktarı, hedeflenen elektrikli araç pazarının boyutunu beslemek için yetersiz kalmaktadır. Şarj altyapısının devreye alınma hızı ve ihtiyacı açısından ülkeler arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. EV başına uygun şarj cihazı sayısı, konut stoku, tipik seyahat mesafeleri, nüfus yoğunluğu ve evde şarj etme bağımlılığı gibi yerel özelliklere bağlı olmaktadır. Evde ve işyerinde şarj etme genel olarak talebin çoğunu karşılama potansiyeline sahiptir. Ancak STEPS'de öngörülen seviyeleri karşılamak ve tüketicilere yeterli imkânı sağlamak için halka açık şarj noktalarının sayısının dokuz kat artması ve 2030'da 15 milyon adete ulaşması gerekmektedir (IEA, 2022).

Dünya çapında elektrikli hafif ticari araç satışları 2021'de %70'in üzerinde artmıştır. Küresel düzeyde elektrikli hafif ticari araç pazar payı, binek otomobillere göre yaklaşık dört kat daha azdır. Gelişmiş EV pazarlarında bile hafif ticari araç payı %12'dir. Hafif ticari araç filolarının yoğun bir şekilde gelişmesi, genellikle öngörülebilir rotalarda çalışması ve ticari depolarda ücretlendirilebilmesi nedeniyle hafif ticari araçlarda elektrifikasyonun sağlanmasının maliyeti arabalardan daha verimlidir. Bugüne kadar çoğu pazarda elektrikli hafif ticari araçların alımının arabalardan daha yavaş olması daha az yakıt ekonomisi ve sıfır emisyon düzenlemeleri, daha az model seçeneği ve çeşitli kullanım profilleri (düşük km) gibi nedenlere bağlıdır (Şekil 2.7) (IEA, 2022).



Şekil 2.7. Bazı Ülkelerde ve bölgelerde elektrikli hafif ticari araç sayısı

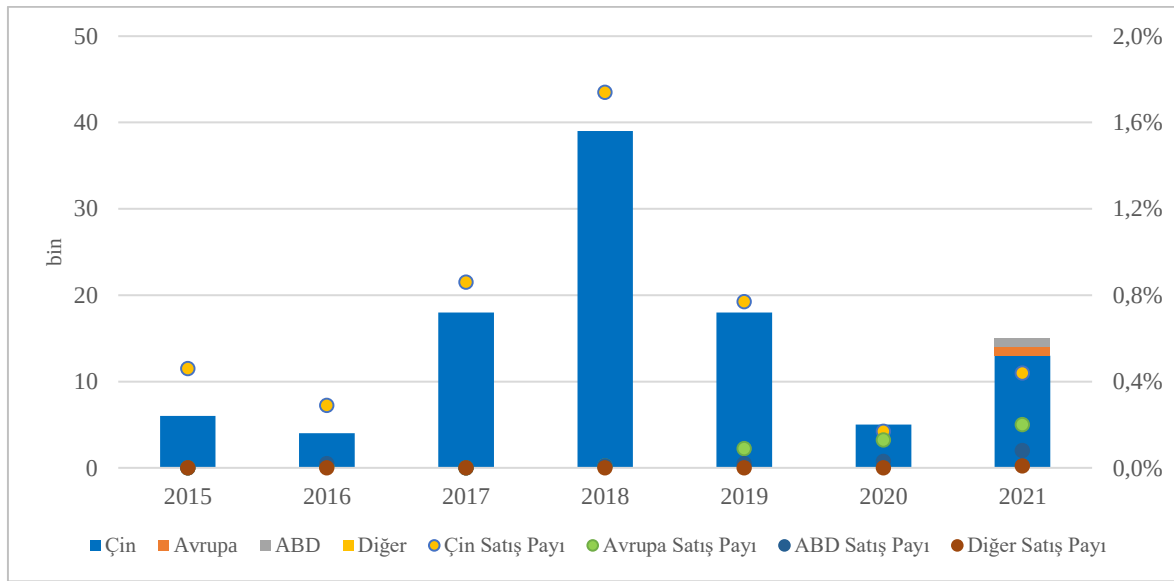
Elektrikli otobüs ve ağır hizmet kamyonlarının kayıtları 2021'de Çin, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde artmıştır. Elektrikli otobüs satışları, küresel otobüs pazarı sabit kalmasına rağmen bu bölgelerde bir önceki yıla göre %40 artmıştır. Elektrikli orta ve ağır hizmet kamyonlarının küresel satışları, 2020 hacmini iki katından fazla artırırken, toplam satış hacimleri kabaca bir önceki yıla aynı seviyede kalmıştır. 2021'de küresel elektrikli otobüs stoğu 670.000 ve elektrikli ağır hizmet kamyonu stoğu 66.000'dir (Şekil 2.8). Bu küresel otobüs filosunun yaklaşık %4'ünü ve ağır hizmet kamyonları için %0,1'ini temsil etmektedir. Önceki yıllarda olduğu gibi, elektrikli otobüs pazarına Çin hakimdir ve yeni kayıtlar artmaya devam etmektedir. Bununla birlikte, 2018'den beri Amerika Birleşik Devletleri'nde ve Avrupa genelinde elektrikli otobüs satışları, küresel pazarın bu hakimiyetini azaltmaya başlamıştır. Hindistan, kendisini dünyanın en büyük elektrikli otobüs pazarlarından biri haline getirecek 5.500'den fazla elektrikli otobüs için bir ihaleyi sonuçlandırmıştır (IEA,2022).



Şekil 2.8. Bazı ülkelerde ve bölgelerde elektrikli otobüslerin sayısı ve satış oranları

Elektrikli kamyonlar, güçlü hükümet desteği sayesinde şuana kadar büyük ölçüde Çin'de ön plana çıkmaktadır. Ancak 2021'de birkaç ülkede ağır kamyon elektrifikasyonu teknolojilerini destekleyeceklerini duyurmuştur. Kamyon üreticileri de yeni elektrikli kamyon modelleri geliştirmiş ve 2021'de Çin dışında 170'ten fazla model satışa sunulmuştur. Hükümet duyurularına uyum sağlamak amacıyla hızlı dağıtım ve net sıfır hedefine ulaşmak için daha fazla çaba gerekmektedir. Elektrikli kamyonlar, 2021'de küresel kamyon satışlarının yalnızca %0,3'ünü oluşturmaktadır (Şekil 2.9). Bunun STEPS'de 2030'a kadar

yaklaşık %10'a ve IEA'nın 2050'ye kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosunda (NZE) %25'e ulaşması beklenmektedir. Kısa mesafeli kamyonlar en hızlı elektrikleenebilen segment olup bu araçlar depo şarjı mevcutsa çoğunlukla geniş bir şarj ağına ihtiyaç duymamaktadır. Daha uzun menzilli kamyonlar, şu anda maliyeti yüksek olan ve genellikle önemli şebeke kapasiteleri gerektiren yüksek güçlü şarj noktaları gerektirecektir. Sonuç olarak, erken planlama ve yatırımlar, şebeke üzerindeki yükü en aza indirmek ve ağır vasıta elektrifikasyonunun bir sonraki aşaması için uygun bir şebeke altyapısı sağlamak için çok önemlidir (IEA, 2022).



Şekil 2.9. Bazı ülkelerde ve bölgelerde elektrikli kamyonların sayısı ve satış oranları

Rusya-Ukrayna savaşı EV'lerin petrol talebini azaltmadaki rolünü ön plana çıkarmaktadır. STEPS'deki taahhütler ve duyurular doğrultusunda elektrikli araçlar sayesinde 2025 yılına kadar günde 1,6 milyon varil (mb/d) ve 2030 yılına kadar günde 4,6 milyon varil (iki ve üç tekerlekli araçlar hariç) petrolün elektrik ile yer değiştirmesi beklenmektedir. İklim değişikliği açısından EV'ler, ICE araçlarının eşdeğer kullanımına kıyasla STEPS'de yaklaşık 580 Mt CO₂ net sera gazı emisyonu azaltımı sağlamaktadır. Bu değer Türkiye'nin toplam CO₂ emisyonlarından daha fazladır. Elektrikli ulaşım doğal olarak elektrik talebini artırmaktadır. STEPS 'de EV'lerin 2030 yılına kadar toplam nihai elektrik talebinin yaklaşık %4'ünü oluşturacağı tahmin edilmektedir (IEA,2022).

Ortalama pil fiyatları 2021 yılında bir önceki yılda görülen %13'lük düşüşten daha az olarak %6 oranında düşmüş ve kWh başına 132 \$'a gerilemiştir (IEA, 2022). Günümüzün pil

tedarik zincirleri, tüm lityum iyon pillerin dörtte üçünü üreten ve katot üretim kapasitesinin %70'ine ve anot üretim kapasitesinin %85'ine (her ikisi de pillerin temel bileşenleridir) ev sahipliği yapan Çin çevresinde yoğunlaşmıştır. Lityum, kobalt ve grafit işleme ve arıtma kapasitesinin yarısından fazlası Çin'de bulunmaktadır. Avrupa, küresel EV üretiminin dörtte birinden fazlasından sorumludur ancak %20'lik kobalt işleme dışında tedarik zincirinin çok azına ev sahipliği yapmaktadır. ABD, EV üretiminin yalnızca %10'u ve pil üretim kapasitesinin %7'si ile küresel EV pil tedarik zincirinde daha da küçük bir role sahiptir (IEA, 2022). Hem Kore hem de Japonya, özellikle son derece teknik katot ve anot malzemesi üretiminde, hammadde işlemenin aşağı akışındaki tedarik zincirinde önemli paylara sahiptir. Karayolu taşımacılığı elektrifikasyonu net sıfır hedeflerini karşılamak için genişledikçe, kritik malzemelerin tedariki üzerindeki baskı artmaya devam etmektedir. Kısa vadede, özellikle tedarik sürelerinin tedarik zincirinin diğer bölümlerine göre çok daha uzun olduğu madencilikte ek yatırımlara ihtiyaç vardır. 2020'lerin sonuna kadar öngörülen mineral arzı, STEPS'teki EV pillerine olan taleple uyumludur. Ancak STEPS 'deki taahhütleri ve duyuruları karşılamak amacıyla EV pillerine olan talebi karşılamak için lityum gibi bazı minerallerin arzının 2030 yılına kadar üçte bir oranında artması gerekmektedir. Örneğin, tahmin edilen en büyük arz-talep açığına sahip emtia olan lityum talebinin STEPS 'de 2030 yılına kadar altı kat artarak 500 Kt'a çıkması gerekmektedir (IEA, 2022).

Son yıllarda otomobil üreticileri, elektrifikasyonu yalnızca politika düzenlemelerine uymanın veya devlet teşviklerine yanıt vermenin bir yolu olarak değil, aynı zamanda pazar payı elde etmek ve rekabet avantajını sürdürmek için bir fırsat olarak gören iş stratejilerini aşamalı olarak planlamaktadır. İleriye bakıldığında, daha agresif fiyatlandırma ve daha geniş bir model yelpazesinin geliştirilmesi beklenmektedir. Bazı pazarlarda, Orijinal Ekipman Üreticilerinin (OEM) birleşik hedefleri, hükümet duyurularından daha iddialıdır (IEA, 2023).

2021'de birçok büyük otomobil üreticisi, yeni ürün serileri geliştirerek ve mevcut üretim kapasitesini dönüştürerek tamamen elektrikli bir geleceğe geçişi hızlandırma planları yapmaktadır (IEA, 2022).

- Dünyanın en büyük otomobil üreticisi Toyota, 30 BEV modelinin piyasaya sürüleceğini ve 2030 yılına kadar yıllık 3,5 milyon elektrikli otomobil satışına ulaşmayı hedeflemektedir.

- Lexus, 2035 yılında dünya çapında %100 BEV satışlarına ulaşmayı hedeflemektedir. Volkswagen, tamamen elektrikli araçların 2030 yılına kadar Avrupa satışlarının %70'ini, Çin ve ABD satışlarının %50'sini geçeceğini ve 2040 yılına kadar satışlarının yaklaşık %100'ünün sıfır emisyonlu araç olmasını hedeflemektedir.
- Ford, F-150 elektrikli modelinin başarısını temel alarak 2026 yılına kadar satışlarının üçte birinin tamamen elektrikli ve 2030 yılına kadar %50'sinin elektrikli olmasını Avrupa'da tamamen elektrikli modele geçmesini hedeflemektedir.
- Volvo, 2030 yılına kadar tamamen elektrikli bir otomobil şirketi olmayı hedeflemektedir.
- Geely, 2025 yılına kadar elektrikli otomobil satışlarının yaklaşık %30'unu hedeflemektedir.
- BMW, 2030 yılına kadar satılan araçlarının %50'sinin tamamen elektrikli olmasını hedeflemektedir.
- Mercedes, 2025'ten itibaren piyasaya sürülen tüm yeni araçlarının tamamen elektrikli olmasını hedeflemektedir.
- General Motors, 2025 yılına kadar Kuzey Amerika'da 30 EV modeli, 1 milyon adet kurulu BEV üretim kapasitesi ve 2040 yılında karbon nötr olmayı hedeflemektedir.
- Stellantis, 2030 yılına kadar Avrupa'daki satışların %100'ünün ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki satışların %50'sinin BEV'ler olmasını hedeflemektedir.
- Hyundai, %7'lik bir küresel pazar payı elde etmek ve 2035'te Avrupa'da içten yanmalı motorlu araçların satışını sonlandırmak için 2030 yılına kadar yılda 1,9 milyon BEV satışı hedeflemektedir.
- Kia, 2030'da BEV satışlarını 1,2 milyona çıkarmayı hedeflemektedir.
- Dongfeng, 2024 yılına kadar ana binek otomobil markalarının yeni modellerinin %100'ünü elektrikli hale getirmeyi hedeflemektedir.
- BYD, Nisan 2022'den itibaren yalnızca BEV'ler ve PHEV'ler üreteceğini duyurmuştur.

Yavaş ama yeterli hızlarda (genellikle bir gecede) şarj ederek maliyetleri düşük tutan depo şarjı, görev döngüsü ve uygulamadan bağımsız olarak ticari araçlar için kullanılan yaygın yöntemdir. Servisler, toplu taşıma veya okul otobüsleri gibi daha uzun ancak düzenli rotaları veya öngörülebilir operasyonları olan uygulamalar için güzergahlar boyunca yüksek hızlı şarjın sağlanması gerekli olabilmektedir. Şehir içi teslimat minibüsleri gibi oldukça değişken güzergâhlara sahip uygulamalar, şehirlerde halka açık şarj istasyonlarından da yararlanabilir. Bölgesel ve uzun mesafeli elektrikli kamyonlara esneklik ve özerklik sağlamak için

otoyollarda çok hızlı şarj sağlayan istasyonlara gerek olmaktadır. Yüksek inşaat ve şebeke entegrasyon maliyetleri göz önüne alındığında, 350 kW veya hatta 1 MW'lık çok hızlı şarj altyapısı, özellikle elektrikli HDV pazarına dağıtımın ilk yıllarında yeterli seviyede olamayabilmektedir. Bu durum ulaşım koridorları boyunca HDV'lere yönelik gerekli şarj kapasitesi için gerekli olan uzun teslim süreleri ve yatırım gereklilikleri ile birleştiğinde ortaya çıkabilecek bazı zorluklardır. Şarj ağlarının gelişimini desteklemeye yönelik politikalar ve önlemler, HDV'ler dahil EV'ler için şarj altyapısının zamanında devreye alınmasında önemli bir etkiye sahip olabilecektir. Tasarım ve geliştirmeyi HDV'nin operasyonel gereksinimleriyle uyumlu olacak şekilde optimize etmek için stratejik planlama gereklidir. Koordineli dağıtım, öncelikle en yoğun kullanılan yük koridorlarına odaklanmalıdır. Elektrikli HDV'lere güç sağlamaya yönelik diğer seçenekler, pil değiştirme ve elektrikli yol sistemleridir. Pil değişimine yönelik pilot programlar (CATL, Foton New Energy Vehicle, Geely, China Energy Investment Corporation ve Qiyuan Motive Power vb.) Çin'deki çeşitli şirketler tarafından yürütülmektedir. Bu denemeler, şehir içi ve bölgesel teslimat gibi ağır hizmet kısa mesafe operasyonlarında sayıları yüzleri bulan filolar için pil değiştirme operasyonlarını içerir. Merkezi hükümetin sekiz şehirde pilot pil değiştirme yönergesi, HDV'ler için batarya değiştirmeye odaklanmayı amaçlayan üç şehir ve önümüzdeki birkaç yıl içinde batarya değiştirmeyi kullanan kamyon sayısını binlere çıkarma hedefini içermektedir. 2022'nin başlarında, Çin pazarındaki 159 yeni kamyon modelinde batarya değiştirme özelliği bulunmaktadır.

Elektrikli yol sistemleri, gücü bir yoldaki endüktif bobinler yoluyla veya araç ile yol arasındaki iletken bağlantılar veya zincir (katener) hatlar aracılığıyla bir kamyonu aktarabilir. Zincir ve diğer dinamik şarj seçenekleri, toplam sermaye ve işletme maliyetleri açısından olumlu rekabet etme açısından umut verici olmaktadır. Bu rekabet gücünün temel belirleyicilerinin HDV'ler için pillerin maliyetleri ve kapasiteleri ile yük trafiğinin hacminin yüksek olduğu çok hızlı otoyol şarjları olmaktadır. Hareket halinde şarjı etkinleştirerek zincir sistemleri lojistik operatörlerinin operasyonel esnekliğini destekleyebilir (THEICCT, 2022). Siemens tarafından Scania kamyonlara kurulan zincir şarj sistemlerinin saha denemeleri, 2016 yılından bu yana otoyollardaki gerçek taşımacılık operasyonlarında kullanılmaktadır (Siemens, 2021). Şu anda 13 km uzunluğundaki üç sistem 15 kamyon tarafından kullanılmaktadır. Almanya, sabit şarj ve yakıt ikmali ile birlikte kullanılan zincir şarj ile donatılmış yüzlerce kilometrelik otoyolu yaygınlaştırmayı amaçlayan inovasyon gruplarını duyurmuştur. Birleşik Krallık, ağır hizmet kamyonları için bir zincir şarj sistemini

denemeyi hedeflemektedir. Birkaç Avrupa ülkesi elektrikli yol sistemlerinin ekonomik uygulanabilirliği ve çevresel etkileri üzerine çalışmalar yaptırmaktadır (PIARC, 2018). Zincir şarj veya diğer dinamik şarj çözümlerinin ayrıca pantograf veya diğer yerleşik güç aktarma bileşenleri ile donatılmış herhangi bir sıfır emisyonlu güç aktarma sisteminde (yani PHEV, BEV veya FCEV) çalışma avantajı bulunmaktadır (Resim 2.1).



Resim 2.1. Zincir şarj sistemi

Bu anlamda ulaştırma sektörünün enerji karışımının dönüşümü sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen sıvı ve gaz biyoyakıtların artan kullanımı ve otomobillerin, otobüslerin, kamyonların ve trenlerin hızlı bir şekilde elektrifikasyonu ile sağlanabileceği değerlendirilmektedir.

2.4. Ulaştırma Politikaları

2.4.1. Politika araçları

Ulaştırma politikaları devletlerin ekonomik, sosyal ve politika faaliyetlerini doğrudan etkilemesi ve önemli bir etmen olması nedeniyle oluşturulmaktadır. Ulaşım, ekonomik kalkınmada hayati bir faktör olarak devletçi veya liberal her türlü hükümet sistemleri tarafından ön planda tutulmaktadır. Ayrıca ulaşım ulusal ekonomiyi teşvik etmede,

geliştirmede ve şekillendirmede kilit bir mekanizma olarak görülür (Bamwesigye ve Hlavackova, 2019). Örneğin Amerika Birleşik Devletleri'nin 1960'lardaki Appalachia Projesi, AB'deki Trans-Avrupa Ağları (TEN'ler) politikası ve Çin'in Kuşak ve Yol Girişimi gibi pek çok geliştirme programı ulaşım temellidir (Notteboom, 2013).

Ulaşım ulusal güvenlikte önemli bir unsurdur. Egemenliği tesis etmek veya ulusal alan ve sınırlar üzerinde kontrol sağlamak için politikalar geliştirilebilmektedir (Cowen, 2010). Örneğin Amerika Birleşik Devletleri'ne otoyol ağını sağlayan 1956 Eyaletler arası Otoyol Yasası, ulusal güvenlik gerekçesiyle formüle edilmiştir (Trump, 2017). Giriş limanında meydana gelen geleneksel izinlere ek olarak, kalkış limanındaki yolcular veya yük izni ile ilgili getirilen kısıtlamaların merkezinde de güvenlik vardır (Roberts, Rose, Heatwole, Wei, Avetisyan, Chan ve Maya, 2014).

Ulaştırma politikalarının amacı, mevcut taşıtma faaliyetlerinin yönetimi ve düzenlenmesi dahil olmak üzere, taşıtma kaynaklarının tahsisine ilişkin etkili kararlar almaktır. Bu nedenle, taşıtma politikası aynı zamanda kamusal ve özel bir çaba olabilmektedir. Yine de hükümetler, taşıtma sisteminin birçok bileşenine veya yönettikleri ve mevcut tüm taşıtma modlarında yetki düzeylerine sahip oldukları için genellikle politika sürecine en çok dâhil olanlardır. Hükümetler ayrıca, düzenleyici bir çerçeve koymanın yanı sıra sağladıkları temel kamu hizmeti nedeniyle ulaşım sistemlerini yönetmenin merkezinde yer almaya çalışırlar. Yine de denizyolu ve hava taşımacılığı gibi birçok taşıtma sistemi, kendi politikalarını belirleyebilen uluslararası pazarlara hizmet veren firmalara ait olabilmektedir. Bununla birlikte Avrupa, Çin, Hindistan ve Japonya kamu mülkiyetine ve operasyonlarına daha çok bağılyken, Amerika Birleşik Devletleri gibi coğrafi farklılıkları olan ülkelerde özel teşebbüslerin önemli ağırlıkları olabilmektedir. Standart düşünce, kamu sektörünün genellikle ulaşım altyapısını ve düzenleyici çerçeveyi sağlaması, özel sektörün ise birçok mod ve terminalin tedarikini ve operasyonlarını üstlenmesidir.

Planlama ve politika arasındaki temel ayırım, politikanın mevzuatla çok daha güçlü bir ilişkiye sahip olmasıdır. Politikalar genellikle planlama müdahalelerini geliştirmek için bir çerçeve görevi gören yasalara ve diğer yasal araçlara dahil edilir. Planlama ise zorunlu olarak yasama eylemi içermez ve genellikle mevcut düzenleyici çerçeve dahilinde belirli bir hedefe ulaşmanın yollarına odaklanır.

2.4.2. Politika uygulamaları

Toplumlar hareketliliğe daha bağımlı hale geldikçe ulaştırma politikaları trafik sıkışıklığı, enerjide dışa bağımlılık ve sera gazı emisyonları gibi tüm ülkeleri etkileyen belirli konulara odaklanmaktadır. Ulusal ulaştırma politikaları rekabetçi, kullanıcı dostu ve uzun vadeli sürdürülebilir bir ulaşım sistemi oluşturmayı hedeflemektedir (Frenzel, Anderson, Lischke, ve Eisenmann, 2021).

Avrupa ulaştırma politikası birçok sürdürülebilirlik sorunuyla karşı karşıyadır. Ulaştırma sektörü, AB'deki insan faaliyetleri tarafından üretilen toplam sera gazı (GHG) emisyonlarının yaklaşık dörtte birini oluşturmaktadır. Ayrıca ulaştırma sektörü AB'de 1990'dan beri sera gazı emisyonu artan tek sektördür. Bu nedenle Avrupa Komisyonu, “Tek Bir Avrupa Ulaştırma Alanına Yönelik Yol Haritası” ile rekabetçi ve kaynakları verimli kullanan bir ulaştırma sistemine doğru 2050'ye kadarki dönem için taşımacılığın geleceği hakkındaki 2011 Beyaz Kitabını 28 Mart 2011'de yayınlamıştır. Bu kitapta,

- 2008 ve 2030 arasında ulaştırma emisyonlarında %20 azaltım (uluslararası deniz taşımacılığı hariç) ve 1990 ile 2050 arasında en az % 60 azaltım sağlanması
- 2005 ile 2050 arasında uluslararası deniz taşımacılığında kaynaklanan emisyonlarda %40 azaltım sağlanması
- Sürdürülebilir, düşük karbonlu yakıtların 2050'ye kadar havacılıkta kullanımın %40'ını oluşturmaları
- 2030'a kadar şehir içi ulaşımında geleneksel yakıt teknolojilerine sahip araçların aşamalı olarak temiz yakıtlı teknolojiye sahip araçlarla en az %50 oranında yer değişmesinin sağlanması ve 2050 yılına kadar tamamen temiz yakıt teknolojilerine sahip araçlara geçilmesi

tavsiye edilmiş ve bu nedenle ulaştırma sektörünün daha verimli ve temiz enerji kullanması, modern altyapıyı daha etkin bir şekilde tasarlaması ve çevre üzerindeki etkisini azaltması hedeflenmiştir. 1 Temmuz 2016'da Komisyon, çalışma belgesi şeklinde bir rapor sunmuş ve Avrupa taşımacılığının karbondan arındırılmasını hızlandırmak için bazı önlemler önerdiği “Düşük Emisyonlu Hareketlilik için Avrupa Stratejisi” başlıklı bir tebliğ yayınlamıştır. Strateji, COP 21 Paris Anlaşması hedeflerine ulaşılmasına yeterince katkıda bulunmak

amacıyla, taşımacılığın geleceği ile ilgili 2011 Beyaz Kitapta belirtildiği gibi, öncelikle sıfır emisyonu ulaşmayı hedeflemiştir.

Avrupa Parlamentosu 2017 yılında Yenilenebilir Enerji Direktifi'nin yeniden düzenlenmesinde önerilenden daha iddialı bir yenilenebilir enerji yaklaşımı ve mevcutta sıvı yakıta alternatif olmayan ulaşım modları için sürdürülebilir alternatif yakıtların konumlandırılması için teşvikler yaratılması çağrısında bulunmuştur. Alternatif yakıtların en geniş kullanımına doğru “Alternatif Yakıtlar Altyapısına İlişkin Eylem Planı (COM (2017) 0652)” başlıklı bir Komisyon tebliğini takiben, Parlamento Ekim 2018'de Komisyona Direktif 2014'te / 94 / EU alternatif yakıt altyapısının konumlandırılması ve uygun şekilde uygulanmasına odaklanmak için bir revizyon getirmesi çağrısında bulunan bir kararı kabul etmiştir. Parlamento ayrıca Komisyonun “Otomatikleştirilmiş hareketliliğe giden yolda (COM (2018) 0283)” başlıklı tebliğe paralel olarak 15 Ocak 2019 tarihli kararda Avrupalı aktörlerin otonom taşımacılıkta dünya liderleri rolünü üstlenmek için güçlerini birleştirmeleri gerektiğini vurgulamıştır (2018/2089 (INI)). 15 Ocak 2020'de Parlamento, Komisyon'un Yeşil Anlaşmaya ilişkin Tebliğine verdiği yanıt olan Avrupa Yeşil Anlaşmasına (2019/2956 (RSP)) ilişkin kararını kabul etmiş ve sürdürülebilir ve akıllı hareketlilik için hedefler belirlemiştir. Daha sonra 13 Kasım 2020'de Parlamento, Ulaşım ve Turizm Komitesinden de (2020/2058 (INI)) gelen girdileri içeren “Sürdürülebilir Avrupa Yatırım Planı - Yeşil Anlaşmanın Finansmanı” hakkında bir kararı kabul etmiştir. COVID-19 salgını ve ardından ulaşım üzerindeki etkisiyle beraber 19 Haziran 2020'de Parlamento hızlı, kısa ve uzun vadeli destek çağrısında bulunarak ulaşım ve turizm sektörlerinin hayatta kalmalarını ve rekabet edebilirliklerini sağlamaları için '2020 ve sonrasında ulaşım ve turizm' (2020/2649 (RSP)) başlıklı bir kararı kabul etmiştir. Parlamento, Mart 2020'den bu yana, salgının ulaştırma sektörü üzerindeki olumsuz etkileriyle mücadele etmeyi amaçlayan acil prosedür kapsamında birkaç ilgili eylemi de kabul etmiştir. Bu doğrultuda özellikle AB'de ulaştırma sektöründe karbondan arındırılma politikaları çok sayıda konuyu ele almaktadır. Genel olarak Emisyon Ticareti Planının (ETS) revizyonu (havacılık ve deniz taşımacılığı dahil), alternatif yakıt altyapısı, CO₂ emisyon performans standartları, akıllı ulaşım sistemleri, trans-Avrupa ağları (TEN-T), demiryolu koridoru girişi (rekabetçi yük taşımacılığı için Avrupa demiryolu ağına ilişkin Tüzüğün revizyonu dahil) ve Euro 6 / VI sonrasının geliştirilmesi için otomobiller, kamyonlar, kamyonlar ve otobüsler için emisyon standartları bunlardan bazılarıdır.

Dünya çapında küresel binek araç filosunun hızla artması ve bu büyümenin yüzde doksanınin gelişmekte olan ve geçiş ekonomilerinde gerçekleşmesi beklenmektedir. Bu doğrultuda ulaştırma sektörünün faaliyetleri, küresel enerji kullanımının yaklaşık %20'sini tüketmekte ve enerji ile ilgili CO₂ emisyonlarının %25'ini üretmektedir. IEA'ya göre ulaştırma sektörü bütün sektörler içinde en yüksek CO₂ emisyon artışına sahiptir ve enerjiyle ilgili CO₂ emisyonlarına katkısının bugün dörtte birden 2050'ye kadar üçte bire çıkacağı tahmin edilmektedir. Buna göre insanların ve yükün temiz yakıtlı teknolojilerle verimli ve güvenli bir şekilde taşınmasını sağlamak, politika uygulamalarının ve enerji geçişinin önemli bir bileşenidir.

Küresel Yakıt Ekonomisi Girişimi (GFEI) araçlarda verimlilik hızlandırıcı hedef ve politikalar belirlemektedir. Öncelikli amaç, emisyonların azaltılması ve küresel araç filosunun verimliliğini 2005 yılında ortalama 8 litre/100 km'den 2050'ye kadar 4 litre/100 km'ye çıkarmaktır. Ayrıca, yeni hafif hizmet araç yakıt ekonomisini yarı yarıya azaltmayı hedeflemektedir. Bu durum 2025 yılına kadar yılda 1 Gt CO₂ ve 2050 yılına kadar yılda 2 Gt CO₂ azaltım sağlanabileceğini göstermektedir.

2015 yılından bu yana, AB filosundaki yeni binek otomobillerin ortalama salımları için kilometre başına 130 gram CO₂ hedefi uygulanmaktadır. 130 g CO₂/km salımları, 100 km benzin başına yaklaşık 5,6 lt benzin (lt/100 km) veya 4,9 l/100 km dizel yakıt tüketimine karşılık gelmektedir. 2021'den itibaren 2025 yılına kadar yeni otomobiller için AB filosundaki ortalama salım hedefi 95 gr CO₂/km olacaktır. AB'de kayıtlı yeni minibüsler, 2017 yılına kadar kilometrede 175 gramdan fazla CO₂ salmakta olup bu salımlar 6,6 l/100 km dizel yakıt tüketimine karşılık gelmektedir. 2020'den sonra ise 2025 yılına kadar hedef, kilometre başına 147 gram CO₂'dir. Bu hedefler referans döneminde (1 Temmuz 2019–30 Haziran 2020) AB ortalamasına kıyasla emisyonların yüzde olarak azaltılması olarak ifade edilmektedir. Bunlar 2025'ten itibaren %15 azalma, 2030'dan itibaren ise %30 azalma anlamına gelmektedir. 2025 hedefine, halihazırda piyasada bulunan teknolojiler kullanılarak ulaşılabileceği değerlendirilmektedir. 2030 hedefinin ise değerlendirilme çalışmaları devam etmektedir. Bu değerlendirmeler sonucunda ilk adım olarak CO₂ emisyon standartları, ağır hizmet taşıtlarından kaynaklanan tüm CO₂ emisyonlarının %65 ila %70'ini oluşturan büyük kamyonları kapsaması beklenmektedir. Ayrıca bu çalışmalarda standartların kapsamının daha küçük kamyonlar, otobüsler, yolcu otobüsleri ve treylerler gibi diğer araç türlerini kapsayacak şekilde genişletilmesi de değerlendirilmektedir.

Söz konusu çalışmalar kapsamında AB yetkilileri 2035 yılına kadarki süreci kapsayacak olan Euro 7 (EU7) standartları ile 2035'ten sonra Avrupa pazarındaki tüm yeni otomobillerin ve minibüslerin sıfır CO₂ şartını sağlaması konusunda uzlaşmaya varmıştır (EC, 2021c). Özellikle elektrikli otomobillere ve minibüslere geçiş, hava kalitesi için de faydalar sağlayacaktır. Ancak, bu tarihten önce piyasaya sürülen içten yanmalı motorlara sahip otomobiller ve minibüsler, Avrupa yollarında en az on yıl veya daha uzun süre kalacaktır. Mevcuttaki otomobillerin ve kamyonetlerin %20'sinden fazlasının ve ağır hizmet taşıtlarının %50'den fazlasının 2050 yılına kadar CO₂ salımı yapması beklenmektedir. Benzer şekilde, otomobiller ve kamyonetler için olduğu gibi, özellikle yaklaşan CO₂ normlarını takip edebilecek yeni elektrikli araçlara geçişten bağımsız olarak, kamyonların ve otobüslerin mümkün olduğunca temiz yakıt teknolojilerine sahip olması gerekmektedir. 2035'te EU7, otomobil ve kamyonetlerden kaynaklanan NO_x emisyonlarını Euro 6'ya kıyasla %35 ve otobüs ve kamyonlardan kaynaklanan emisyonları Euro 6'ya kıyasla %56 azaltması beklenmektedir. Aynı zamanda, egzoz borusundan çıkan partiküllerin araba ve kamyonetlerden %13, otobüs ve kamyonlardan %39, arabaların frenlerinden gelen partiküllerden ise %27 oranında azaltılması öngörülmektedir (EC, 2022).

2050 yılına kadar ise AB, ulaşım ile ilgili sera gazı emisyonlarında 1990 seviyelerine göre %60 azalma hedeflemektedir. Bu kapsamda;

- Artık şehirlerde geleneksel yakıtla çalışan arabaların olmaması
- Havacılıkta sürdürülebilir düşük karbonlu yakıtların karışımının en az %40 olması
- Deniz yakıtlarından kaynaklanan CO₂ emisyonlarında %40 azalma
- 300 km'den daha büyük veya buna eşit yük taşımacılığının karayolundan demiryoluna ve denizyoluna %50 kayması
- Orta mesafeli seyahatlerin çoğunun demiryolu ile yapılması
- Tam Avrupa yüksek hızlı demiryolu ağı
- Eksiksiz trans-Avrupa ulaşım ağı

amaçlanmaktadır.

Son zamanlarda Türkiye karayolu, demiryolu ve hava taşımacılığı üzerine çeşitli projelerle bu modların pkm'sinde önemli gelişmeler kaydetmiştir. Karayolu taşıtları ve trenler için pkm, 2000-2018 yılları arasında büyük ölçekli yol projeleri ve artan tren kullanımı ile

sırasıyla %75 ve %53 oranında artmıştır. Son 20 yılda bölünmüş yolların uzunluğu 6.000 km'den 28.260 km'ye, karayollarının uzunluğu ise 700 km'den 3.500 km'ye yükselmiştir. 2035 yılına kadar 13 proje ve 3.726 kilometre daha otoyol uygulanması planlanmaktadır. 2000'li yılların başından itibaren otoyol yatırımları devam ederken bir yandan da bölünmüş yol yapım çalışmaları başlatılmıştır. Bunun sonucu olarak 6.101 km olan bölünmüş yol uzunluğu 2022 Mayıs ayı sonu itibarıyla otoyol dahil 28.660 km'ye, otoyol uzunluğu ise 3.633 km'ye ulaşmıştır. 2022 Mayıs ayı itibarıyla köy yolları da dahil edildiğinde 257.446 km karayolu bulunmaktadır.

Çizelge 2.8. Özelliklerine göre Türkiye'deki karayolu uzunlukları

Karayolu Uzunlukları (km)	Bölünmüş	Diğer
Devlet ve il Yolları Toplamı	23.441	41.553
Devlet Yolu	21.292	9.673
İl Yolu	2.149	31.880
Otoyol	3.633	
Köy Yolu		188.819
Genel Toplam	257.446	

2000'li yıllarda demiryolu yatırım ödenekleri artmış ve yolcu trenlerinin hızlandırılması çalışmaları ağırlık kazanmıştır. 2000'li yıllar aynı zamanda demiryolu sisteminin belli politikalar paralelinde özel sektöre daha yoğun açıldığı yıllar olmuştur. Yüksek hızlı tren, şu anda faaliyette olan 4 rota ve yapım aşamasında olan 4 rota ile buna katkıda bulunmaktadır. Gelecekte yeni hızlı tren ağına bağlı il sayısının 8'den 52'ye çıkarılması hedeflenmektedir. Elektrifikasyonun artırılması (hala demiryollarının %50'<), demiryolu emisyonlarının 2000 yılında 0,7 Mt CO₂'den 2020 yılında 0,3 Mt CO₂'ye düşürülmesine katkıda bulunmuştur. 2022 yılı itibarıyla 11.590 km'si konvansiyonel hat, 1.213 km'si YHT hattı, 219 km'si HT olmak üzere toplam demiryolu uzunluğu 13.022 km'ye yükselmiştir. Aynı dönemde 2.305 km olan elektrikli hat uzunluğu da 5.986 km; 2.665 km olan sinyalli hat uzunluğu ise 7.094 km olmuştur.

Türkiye'de hava taşımacılığının kullanımı hızla artmaktadır. Yirmi yılda iç hat yolcu sayısı 13 milyondan 100 milyona yükselmiştir (UAB, 2022). Havacılık emisyonları bu süre zarfında yaklaşık 2,5 Mt CO₂'den 3,5 Mt CO₂'ye yükselmiştir (ETKB, 2022). Bu süre zarfında, kişi başına GSYH'de 3.100 \$'dan 9.500 \$'a artmıştır (Dünya Bankası, 2022a).

Bu çalışmada AB ve Türkiye'nin emisyon azaltım hedefleri doğrultusunda belirlenen ve hazırlık aşamasında olan politika eylemleri, senaryo varsayımlarının temelini oluşturmaktadır. Türkiye'de net sıfır emisyon hedefine yönelik resmi politikalar henüz tam olarak açıklanmamış olsa da açıklanacak yeni politikaların AB politika ekseninden uzaklaşmayacağı değerlendirilmektedir. Türkiye'nin ve bazı AB ülkelerinin ulaştırma sektörü için son dönemde resmi olarak belirlediği ve çeşitli raporlarda vurguladığı bazı politika ve hedefler Çizelge 2.9'da verilmiştir. Bu bağlamda, ulaştırma sektöründeki emisyon azaltma potansiyelini gerçekleştirmek için sınıflandırılan çeşitli kaldıraçlar da Çizelge 2.10'de verilmiştir (Ovaere ve Proost, 2022).

Çizelge 2.9. Türkiye ve AB ülkelerinde ön plana çıkan ulaştırma politikaları

Ulusal İklim Değişikliği Eylem Planı 2011-2023 (ÇŞİDB, 2011)	INDC 2015 (UNFCCC, 2015b)
2023 yılına kadar demiryollarının yük taşımacılığındaki payının (2009-%5) %15'e ve yolcu taşımacılığındaki payının (2009-%2) %10'a çıkarılması 2023 yılına kadar denizyollarının yük taşımacılığındaki payının (2009 yılında %2,66) %10'a, yolcu taşımacılığındaki payının (2009 yılında %0,37) %4'e çıkarılması 2023 yılına kadar karayollarının yük taşımacılığındaki payının %60'ın altına, yolcu taşımacılığındaki payının ise %72'ye düşürülmesi	- Karayolu taşımacılığının payının azaltılması, denizyolu ve demiryolu taşımacılığının payının artırılması - Kombine taşımacılığın geliştirilmesi - Alternatif yakıtların ve temiz araçların teşvik edilmesi - Yüksek hızlı demiryolu projelerinin gerçekleştirilmesi - Kent içi raylı sistemlerin artırılması - Eski araçların ruhsatlarının iptali
Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023 (ETKB, 2018)	Yeni otomobiller ve minibüsler için CO ₂ emisyon performans standartları (2020) ve ağır hizmet araçları için CO ₂ emisyon performans standartları (2019) (EC, 2020)
- Vergi avantajları da dahil olmak üzere enerji tasarruflu araçların teşvik edilmesi - Alternatif yakıtlar ile yeni teknolojileri karşılaştıran çalışmaların geliştirilmesi - Şehir trafiği yoğunluğunun azaltılması ve toplu taşımının teşvik edilmesi - Ülke içi denizyolu ve demiryolu taşımacılığının güçlendirilmesi	- Yönetmelik ile 2020, 2025 ve 2030 yıllarından itibaren emisyon hedefleri belirlenmekte ve sıfır ve düşük emisyonlu araç alımı için teşvikler sağlanmaktadır. Bir araç üreticisinin filoları belirli bir emisyon hedefini aşarsa, üretici bir ceza ödemek zorundadır. - Türkiye ihracatı için doğrudan bir gereklilik yoktur, ancak Türkiye'de üretilen araçların AB talebindeki payını koruyabilmesi için Türkiye ihracatının bu hedeflere uyması gerekecektir. - Üye ülkeler bir otomobilin yakıt verimliliğini ve CO₂ emisyonlarını gösteren bir etiket dahil olmak üzere ilgili bilgilerin tüketicilere sunulmasını sağlamalıdır. - Türk ihracatı için doğrudan bir gereklilik yoktur, ancak rakiplerine göre nispeten daha az yakıt verimli/daha fazla CO₂ yayarlarsa, Türk ihracatına olan talep payı azalabilir. - Fransa, 2040 yılında içten yanmalı motorlu otomobillerin satışını yasaklayacak. Fransa 2030 yılına kadar ulaşım için %28'lik bir emisyon azaltma hedefi belirledi (2015'e göre). - Almanya, 2030'a kadar (1990'a göre) ulaşım için %40-42'lik bir emisyon azaltma hedefi belirliyor. 2021'de başlatılan ulaşım ve binalar için ulusal ETS bu hedefi desteklemektedir.
UK Transport decarbonization plan and UK LTS	
2030'dan itibaren yeni benzinli ve dizel araba satışının yapılmaması, 2035'ten itibaren daha küçük dizel kamyonların satış ve 2040'a kadar daha büyük dizel kamyonların satışının yasaklanması. Otomobiller, kamyonetler ve ağır vasıtalar için 2025 ve 2030'da uygulanacak daha katı CO₂ emisyon standartların belirlenmesi	
2053 Ulaştırma ve Lojistik Master Planı (UAB, 2022)	
- Demiryollarının yolcu taşımacılığında payının %1'den %6,20'ye, yük taşımacılığında payının %5,1'den %21,9'a çıkarılması - Hızlı tren bağlantısı olan il sayısının 52'ye çıkarılması - İhtiyaç duyulan toplam enerjinin %35'ini yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi - Enerji Verimliliği altyapısının oluşturulması	

Çizelge 2.10. Emisyon azaltımı için çeşitli kaldıraçlar

Verimlilik iyileştirmeleri	Şehirlerarası ve şehir içi ulaşımında toplu taşımaya geçiş
Elektrikli ve yakıt hücreli elektrikli araçlar	Aktif taşımaya doğru modal geçiş
Biyoyakıt	Şehirlerde araba paylaşımına modal geçiş
Yük için demiryolu ve denizyolu taşımacılığa doğru modal geçiş	Daha düşük ulaşım talebine yol açan davranış değişikliği

2.5. Elektrik ve Ulaştırma Sektörlerinde Net Sıfır Emisyon Hedefleri

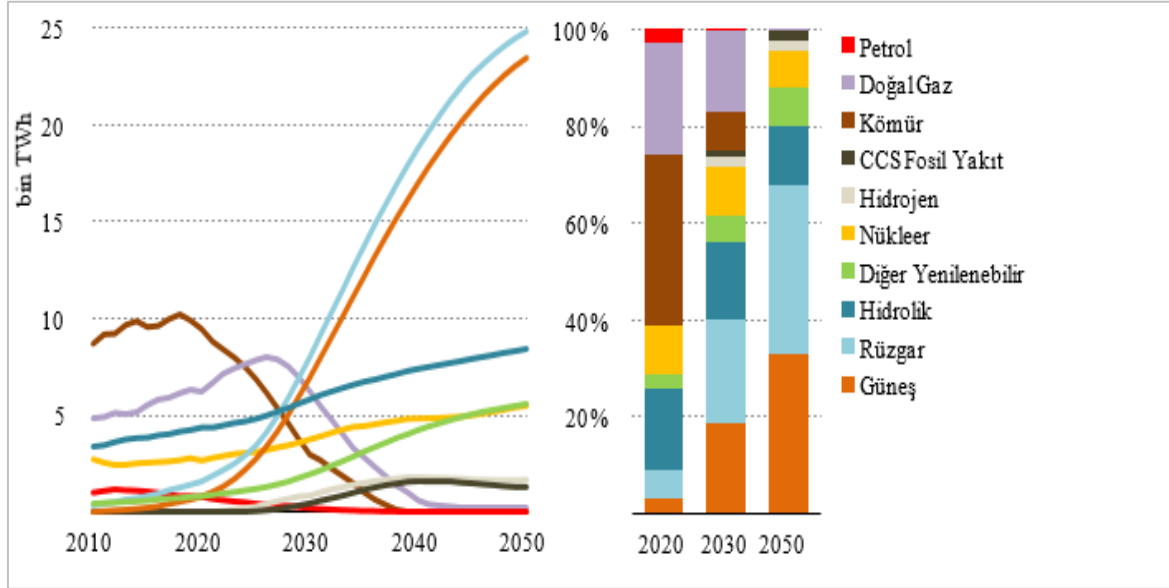
2.5.1. Elektrik sektörü

Net sıfır emisyon (NSE) hedefleri hem elektrik ihtiyaçlarında önemli bir artışı (ekonomik faaliyetlerdeki artışla beraber nihai enerji tüketimini oluşturan sektörlerin hızlı elektrifikasyonu ve elektroliz yoluyla hidrojen üretiminin genişletilmesi) hem de elektriğin üretim biçiminde radikal bir dönüşümü zorunlu kılmaktadır. Son 10 yılda Dünyada elektrik talebi yıllık ortalama %2,3 büyürken, NSE hedefleri ile ortaya çıkan elektrifikasyon ihtiyacı ile birlikte talebin 2050 yılına kadar yıllık ortalama %3,2 oranında artması beklenmektedir. Gelişmekte olan ekonomilerin 2050'ye kadar artacak olan elektrik talebinin %75'ini oluşturmaları beklenmektedir. Artan nüfus, kişi başı gelir ve yaşam standartlarının yanı sıra dekarbonizasyona bağlı yeni talepler sonucunda elektrik talebinin 2050 yılına kadar üç katına çıkacağı öngörülmektedir (IEA, 2022).

Elektrik sektörünün dönüşümü, 2050'de net sıfır emisyonu ulaşmanın merkezinde yer almaktadır. Elektrik üretimi, bugün enerjiyle ilgili CO₂ emisyonlarının en büyük kaynağı ve toplam enerjiyle ilgili emisyonların %36'sını oluşturmaktadır. Dünya çapında elektrik üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları 2020'de toplam 12,3 Gt olup bunun 9,1 Gt'si kömür kaynaklı elektrik üretiminden, 2,7 Gt'si gaz kaynaklı elektrik üretiminden ve 0,6 Gt'si petrol kaynaklı elektrik üretiminden oluşmaktadır. NSE hedeflerinde elektrik üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının 2030'larda gelişmiş ekonomilerde, 2040'larda ise gelişmekte olan ekonomilerde azalacağı öngörülmektedir (IEA, 2022). Ancak küresel krizler, savaşlar, salgın hastalıklar vb. beklenmeyen gelişmeler özellikle fosil kaynaklı elektrik üretim santrallerinin en az rezerv kapasite mekanizmalarında olmak üzere sisteme esneklik imkanı sağlamaya devam edeceği değerlendirilmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları NSE hedeflerinde elektrik sektörünün karbondan arındırılmasına en çok katkıda bulunması beklenen kaynaklardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından küresel elektrik üretiminin 2030'a kadar yaklaşık üç katına, 2050'ye kadar ise sekiz katına çıkması beklenmektedir. Bu durum yenilenebilir enerjinin toplam elektrik üretimindeki payını 2020'de %29'dan 2030'da %60'ın üzerine ve 2050'de yaklaşık %90'a çıkarması beklenmektedir. Ancak bu öngörülerle beraber elektrik sisteminin

sürdürülebilirliği kaynaklı ortaya çıkabilecek enerji arz güvenliği sorunlarını en aza indirebilmek için güç sisteminin esnekliğini iyileştirecek batarya depolama sistemlerini güneş PV ve rüzgar ile bütünleştirmek gerekmektedir.



Şekil 2.10. 2050 yılında net sıfır emisyon için elektrik sektörü görünümü (IEA, 2021b)

NSE hedefleri için nükleer santrallerinde önemli katkılar sağlaması beklenmektedir. Buna göre nükleer kaynaklı elektrik üretiminin 2030'a kadar istikrarlı bir şekilde %40 artması ve 2050'de ikiye katlanması öngörülmektedir. Ancak toplam elektrik üretimi içindeki payının 2050'de %10'un altına düşmesi beklenmektedir. Gelişmiş ekonomilerde nükleer santraller düşük karbonlu elektriğin en uygun maliyetli kaynaklarından biri oldukları için (IEA, 2019) birçok ülkede mevcut reaktörlerin kullanım ömrünün uzatılmasına çalışılırken, küçük modüler reaktörlere artan ilgi nedeniyle yeni kapasitelerin 2021'den 2035'e kadar yılda ortalama yaklaşık 4,5 GW'a çıkması öngörülmektedir. Küçük modüler reaktörler ve diğer gelişmiş reaktör tasarımları, ölçeklenebilir tasarımlar, daha düşük ön maliyetler ve hem operasyonlar hem de çıktılar açısından nükleer enerjinin esnekliğini geliştirme potansiyeli ile tam ölçekli gösterime doğru ilerlemektedir. Buna rağmen, gelişmiş ekonomilerde toplam üretimin nükleer payı 2020'de %18'den 2050'de %10'a düşmesi beklenmektedir. NSE'deki yeni nükleer enerji kapasitesinin üçte ikisi, gelişmekte olan ekonomilerde, çoğunlukla büyük ölçekli santraller şeklinde inşa edilmektedir. Bu ülkelerdeki elektrik üretiminde nükleerin payının 2020'de %5'ten 2050'de %7'ye çıkması beklenmektedir (IEA, 2021b).

Kömür ve gaz yakıtlı kapasitenin CCS ile güçlendirilmesi NSE hedefleri kapsamında emisyonları azaltırken aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarından dolayı artacak sistem esneklik ihtiyacına katkıda bulunacaktır. Ancak bu teknolojinin sisteme entegrasyonu ilk yatırım maliyeti ve verimlilik değerlerine göre şekillenmekte ayrıca karbon yakalanması sonucunda ortaya çıkacak depolama alanı ihtiyacının mevcudiyeti de büyük önem taşımaktadır. CCS'ler, kömür yakıtlı enerji santralleri için Çin'de ve gaz yakıtlı kapasite için Amerika Birleşik Devletleri'nde yoğunlaşmıştır. Bu teknolojilerin NSE senaryolarında 2030'dan 2050'ye kadar toplam üretimin %2'sini sağlaması ve dönem boyunca toplam 15 Gt CO₂ emisyonu yakalaması beklenmektedir (IEA, 2021b).

Elektrik sektörünün göreceli olarak düşük maliyetleri, yaygın politika desteği ve bir dizi yenilenebilir enerji teknolojisinin olgunluğu nedeniyle net sıfır emisyonu ulaşan ilk sektörlerden biri olması beklenmektedir. Solar PV birçok pazarda en ucuz elektrik enerjisi kaynağı olup birçok ülkede de politika desteğine sahiptir. Kara rüzgarı ise düşük maliyetleri ve hızla ölçeklendirilebilmesi ile koşullara göre güneş enerjisinin düşük maliyetleriyle rekabet edebilmektedir. Ancak kara rüzgarı kapsamlı izin ve lisans süreçleriyle çeşitli piyasalarda bazı sorunlarla karşı karşıya kalabilmektedir. Offshore rüzgar teknolojisi son yıllarda hızla gelişmekte ve sistemlere entegrasyonu hızlanmaya başlamaktadır. NSE hedeflerinde 2030'dan itibaren dünya çapında önemli bir hızla katkı sağlamaya başlaması öngörülmektedir. Hidroelektrik santraller köklü, olgun ve esnek yenilenebilir enerji kaynaklarındandır. Bu santraller elektrik arz güvenliği için kritik öneme sahip olup maliyetlerinde yaşanmış olan keskin düşüşler, yüksek değerli şebeke hizmetleri sağlama yeteneklerini kanıtlamış olmaları ve birçok yerde hızlı bir şekilde inşa edilebilmeleri sebebiyle önemli avantajlara sahiptir (IEA, 2021b).

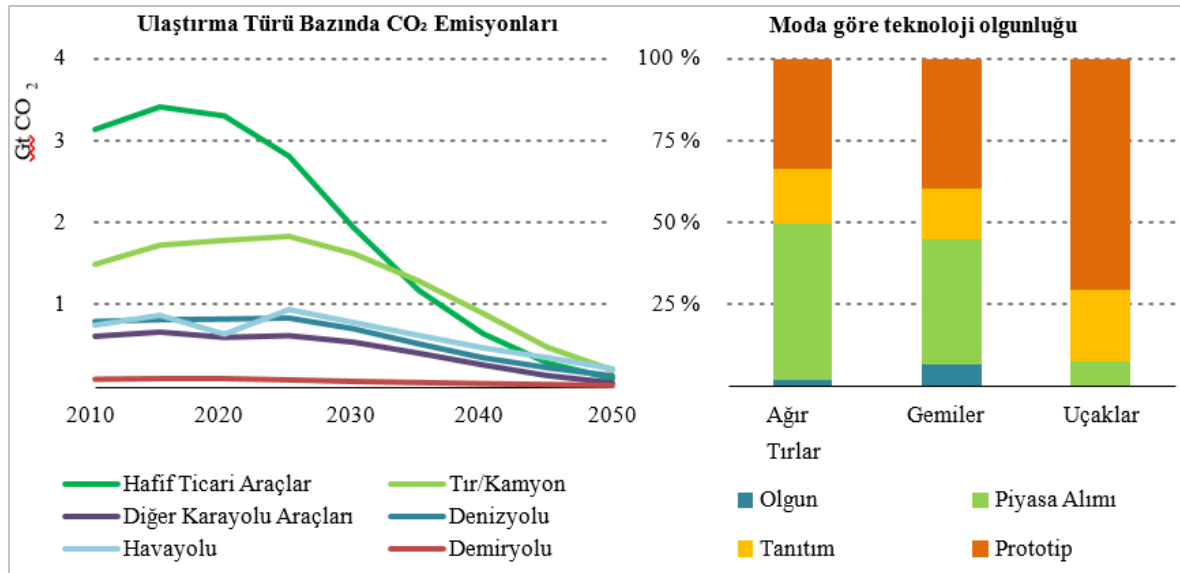
Çizelge 2.11. 2050 yılında net sıfır emisyon için elektrik sektörü görünümü-2 (IEA, 2021b)

	2020	2030	2050
Toplam elektrik üretimi (TWh)	26.800	37.300	71.200
Yenilenebilir enerji kaynakları			
Kurulu Güç (GW)	2.990	10.300	26.600
Toplam Üretimdeki Payı (%)	29%	61%	88%
Güneş PV ve rüzgarın toplam üretimdeki payı (%)	9%	40%	68%
Karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) üretimi (TWh)			
CCUS ile donatılmış kömür ve gaz santralleri	4	460	1.330
CCUS'lu biyoenerji tesisleri		130	840
Nükleer enerji	2016-20	2021-30	2031-50
Yıllık ortalama kapasite eklemeleri (GW)	7	17	24

2.5.2. Ulaştırma sektörü

Küresel taşımacılık sektörü, 2020'de 7 Gt CO₂ ve Covid-19 salgını öncesinde 2019'da yaklaşık 8,5 Gt CO₂ salımı gerçekleştirmiştir. 2050 yılına kadar yolcu ve yük faaliyetlerinin en az iki kat artması, araç stokunun ise 1,2 milyardan 2 milyar seviyesine çıkması beklenmektedir. Buna rağmen NSE hedeflerinde ulaştırma sektörü kaynaklı CO₂ emisyonları 2030'da 5,5 Gt seviyelerinde, 2050'de ise 2020 yılına göre %90'lık bir düşüşle yaklaşık 0,7 Gt seviyelerinde gerçekleşmesi beklenmektedir (IEA, 2021b).

Ulaştırma modları teknolojik kısıtların yarattığı farklılıklardan dolayı aynı oranda karbondan arındırılmamaktadır. Buna göre NSE senaryolarında iki/üç tekerlekli araçlardan kaynaklanan CO₂ emisyonları 2040'a kadar neredeyse sıfırlanmakta; bunu 2040'ların sonlarında otomobiller, kamyonetler ve demiryolu araçları takip etmektedir. Diğer modlarda ise ağır yük kamyonlar ile denizcilik ve havacılıktan kaynaklanan emisyonlar 2020 ile 2050 arasında yıllık ortalama %6 azalmakta ancak 2050'de toplu olarak 0,5 Gt CO₂'nin üzerinde kalmaktadır. Bu durum söz konusu modlarda birçok yeni teknolojinin gerekli olduğunu göstermekle beraber birçok teknolojik gelişim çalışmaları devam etmesine rağmen yakın zamanda bu konuda piyasada önemli gelişmelerin olması beklenmemektedir (IEA, 2021,c).



Şekil 2.11. 2050 yılında net sıfır emisyon için ulaştırma sektörü görünümü (IEA,2021b)

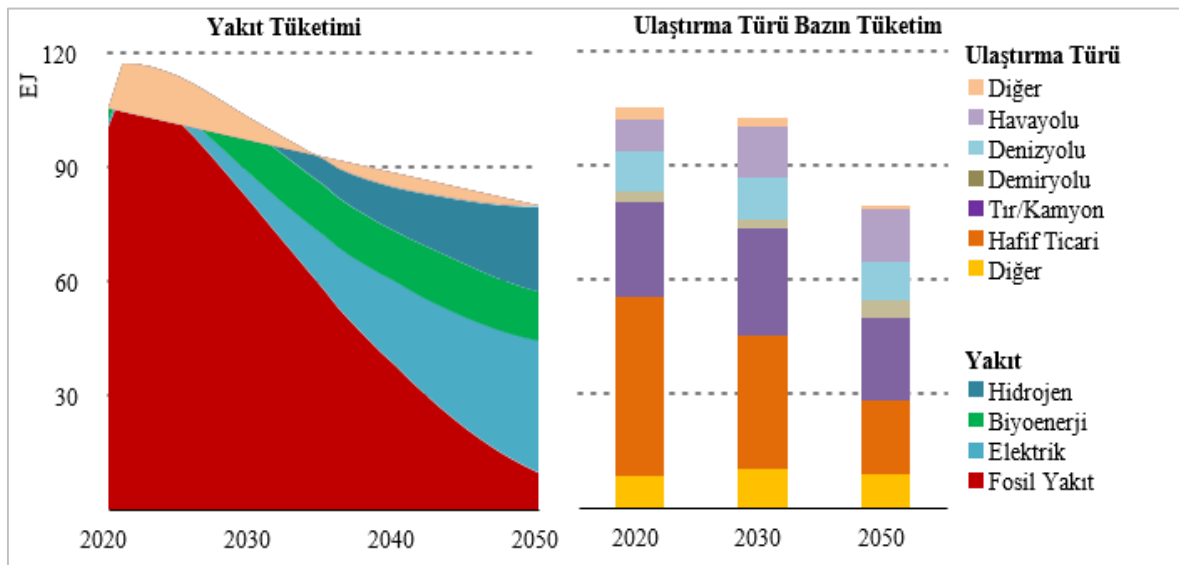
NSE çalışmalarında ulaştırma sektörünün karbondan arındırılması yolcu taşımacılığında mod değişimlerini, daha verimli teknolojileri ve enerji verimliliğindeki iyileştirmeleri teşvik

eden politikalara dayanmaktadır. Bu politikalar iki ana teknoloji ve mevcut teknolojilerde düşük karbon yakıtlı uygulamalar ekseninde şekillenmektedir.

- Elektrikli mobilité
- Yakıt hücreli elektrikli araçlar
- Daha yüksek yakıt karışım oranları ve düşük karbonlu yakıtların sisteme entegrasyonu

Ulaştırma sektörü, geleneksel olarak biyoyakıtlar ve elektrikten gelen hızlı değişimlere rağmen 2020'de sektörün enerji ihtiyacının %90'ından fazlasını oluşturan petrol ürünlerine büyük ölçüde bağımlı olmuştur. NSE hedeflerinde petrolün payı 2030'da %75'in altına gerilemesi ve 2050'de ise %10 seviyelerinde gerçekleşmesi beklenmektedir. 2040'ların başında elektrik enerjisinin NSE senaryolarında dünya çapında ulaştırma sektöründe baskın yakıt haline gelmesi öngörülmektedir (IEA, 2021b).

NSE hedeflerinde biyoyakıtlar karayolu taşımacılığında 2030 yılına kadar petrol ürünlerinde neredeyse %15 karışım payına ulaşmakta ve bu da petrol ihtiyacını günde yaklaşık 4,5 milyon varil petrol eşdeğeri (mboe/d) azaltmaktadır (IEA, 2021b). 2030'dan sonra biyoyakıtların elektrik ve hidrojen kullanım kapsamının daha sınırlı olduğu havacılık ve denizcilik için giderek daha da artması beklenmektedir. Hidrojen taşıyıcılar (amonyak gibi) ve düşük emisyonlu sentetik yakıtlar da bu modlarda teknolojik gelişmelere göre enerji talebinin artan paylarını oluşturabileceklerdir.



Şekil 2.12. 2050 yılında net sıfır emisyon için ulaştırma sektörü görünümü-2 (IEA,2021b)

Elektrifikasyon, NSE hedeflerinde karayolu taşıtlarının karbondan arındırılmasında merkezi bir rol oynamaktadır. On yıl içinde pil maliyetlerinde yaşanan %90'lık azalış özellikle son beş yılda elektrikli binek otomobil satışlarını %40 artırmıştır (IEA, 2021b). Bataryaların ağırlığı, şarj için gereken güç gereksinimleri ve sürüş mesafelerindeki sınırlamalar nedeniyle ağır yük kamyonlarının elektrifikasyonu daha yavaş ilerlemektedir.

NSE hedeflerinde hafif hizmet araçlarının orta vadede gelişmiş ekonomilerde daha hızlı elektrikleşmesi ve 2030 yılına kadar satışların yaklaşık %75'ini, gelişmekte olan ekonomilerde ise satışların yaklaşık %50'sini oluşturması beklenmektedir. 2030'un ortalarından itibaren gelişmiş ekonomilerde yeni satışların tamamının elektrikli, plug hibritli ve yakıt hücresel olması beklenmektedir (IEA, 2021b).

Uzun mesafelerde hareket eden ağır kamyonlar için biyoyakıtlar, dizelin ana ticari alternatifidir ve emisyonların düşürülmesinde önemli bir rol oynamaktadır. 2030'dan sonra, destekleyici altyapı inşa edildikçe ve maliyetler düştükçe (daha düşük pil maliyetleri, enerji yoğunluğu iyileştirmeleri ve hidrojen üretme ve dağıtma maliyetleri daha düşük) NSE hedeflerinde elektrikli ve hidrojenle çalışan ağır kamyonların sayısı artmaktadır (IEA, 2020b). Bu durum sürdürülebilir biyoenerjinin mevcudiyetindeki azalmayla aynı zamana denk gelmektedir. Çünkü sınırlı kaynaklar giderek havacılık ve denizcilik gibi emisyonların azaltılmasının zor olduğu sektörlerle kaymaktadır. Buna rağmen biyoyakıtların 2050'de ağır hizmet kamyonlarının yakıt ihtiyacının yaklaşık %10'unu karşılamaya devam etmesi beklenmektedir (IEA, 2021b).

NSE hedeflerinin gerçekleştirilmesi, pil üretiminin hızlı bir şekilde ölçeklendirilmesine (2030 için ilan edilen mevcut üretim kapasitesi, o yıl için gerekli talebin yalnızca %50'sini karşılayacaktır) ve yeni nesil pil teknolojilerinin piyasaya hızla sunulmasına bağlıdır (IEA, 2021b). Kamyonlara elektrik sağlamak için iletken veya endüktif güç aktarımı kullanan elektrikli yol sistemleri, uzun mesafeli operasyonlarda bataryalı elektrikli ve yakıt hücresel elektrikli kamyonlar için bir alternatif sunmaktadır. Ancak bu sistemlerin de hızlı bir şekilde geliştirilmesi ve devreye alınması gerekmektedir (Volvo, 2020).

Havacılıktan kaynaklanan küresel CO₂ emisyonları NSE hedeflerinde 2020'de yaklaşık 640 Mt'dan (2019'daki yaklaşık 1 Gt'den) 2025 civarında 950 Mt'ye yükselmektedir. Söz konusu hedefler altında düşük emisyonlu yakıtların kullanımı nedeniyle bu emisyonların 2050'de 210 Mt'ye düşmesi beklenmektedir. Havacılık, yüksek enerji yoğunluğuna sahip yakıt

gerektirdiğinden bu modda emisyonları azaltmak diğer modlara göre daha zordur. Bundan dolayı havacılıktaki emisyonların 2050'de fosil yakıtlardan ve endüstriyel süreçlerden kaynaklanan azalmayan CO₂ emisyonlarının %10'undan biraz fazlasını oluşturması beklenmektedir (IEA, 2021b).

Sürdürülebilir havacılık yakıtı (SAF) kullanımını 2020'lerin sonlarında önemli ölçüde artmaya başlamıştır. NSE hedeflerinde 2030 yılında havacılıktaki toplam yakıt tüketiminin yaklaşık %15'inin SAF'ın oluşturması beklenmektedir. Bunun, orta mesafeli bir uçuş için bilet fiyatını yolcu başına yaklaşık 3\$ artıracak tahmin edilmektedir. 2050 yılına kadar havacılıkta toplam yakıt tüketiminin %45'ini biojet kerosen, %30'unu ise sentetik hidrojen bazlı yakıtların karşılayacağı öngörülmektedir. Bunun, 2050'de orta mesafeli bir uçuş için bilet fiyatını yolcu başına yaklaşık 10\$ artıracak tahmin edilmektedir (IEA, 2021b).

Deniz taşımacılığı, 2020'de dünya çapında yaklaşık 830 Mt CO₂ emisyonundan sorumludur. Bu durum toplam enerji sektörü emisyonlarının yaklaşık %2,5'ine neden olmaktadır. Piyasadaki düşük karbonlu seçeneklerin bulunmaması ve gemilerin uzun ömürlü olması (tipik olarak 35 yıl) nedeniyle denizcilik NSE hedeflerinde 2050 yılına kadar sıfır emisyona ulaşamayan birkaç taşıma modundan biri olmaktadır. Bununla birlikte, nakliyeden kaynaklanan emisyonların yılda %6 düşerek 2050'de 120 Mt CO₂'ye gerilemesi beklenmektedir (IEA, 2021b).

Orta ve uzun vadede NSE hedeflerinde biyoyakıtlar, hidrojen ve amonyak gibi düşük karbonlu yakıtlara geçilerek önemli emisyon azaltımları sağlanabilecektir. Amonyak, ölçeği büyütmek için özellikle iyi bir aday ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip yakıt gerektiren uzun menzilli okyanus ötesi yolculuklar için kritik bir yakıt olarak görülmektedir (IEA, 2020).

Sürdürülebilir biyoyakıtların NSE hedeflerinde 2050 yılında toplam denizcilik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %20'sini karşılaması beklenmektedir. Sıvı yakıtlarla karşılaştırıldığında pillerin nispeten düşük enerji yoğunluğuna sahip olması yalnızca 200 km'ye kadar olan denizcilik faaliyetleri için pilleri uygun kılmaktadır. Mevcut teknolojilerde pil enerji yoğunluğunda %85'lik bir artış olsa da yalnızca kısa mesafeli denizcilik faaliyetlerinin elektrikleştirilebileceği değerlendirilmektedir.

Demiryolu taşımacılığı, insanları taşımada en enerji verimli ve en az karbon yoğun yoldur ve yük taşımak için denizcilik faaliyetinden sonra en verimli ikinci yoldur. NSE hedeflerinde 2050'ye kadar toplam ulaşım faaliyetlerindeki yolcu demiryolu payının neredeyse ikiye katlayarak %20'ye çıkması beklenmektedir. Özellikle şehir içi ve yüksek hızlı demiryolundaki hızlı büyüme hava yolculuğundaki büyümeyi dengelemektedir. Demiryolu sektöründen kaynaklanan küresel CO₂ emisyonlarının 2020'de 95 Mt CO₂'den NSE hedefleri altında 2050'de elektrifikasyonun etkisiyle neredeyse sıfıra düşmesi beklenmektedir (IEA, 2021b).

Çizelge 2.12. 2050 yılında net sıfır emisyon için ulaştırma sektörü görünümü-3 (IEA, 2021b)

Karayolu taşımacılığı	2035: Küresel olarak içten yanmalı motorlu yeni binek otomobil satışı yok			
Havayolu ve denizyolu taşımacılığı	Hırsız emisyon azaltma hedeflerin mümkün olan en kısa sürede uygulanması			
		2020	2030	2050
Karayolu Taşımacılığı				
PHEV, BEV ve FCEV'in satışlardaki payı:	Binek Otomobil	5%	64%	100%
	2-3 Tekerlekli	40%	85%	100%
	Otobüs	3%	60%	100%
	Kamyonet-Minibüs	0%	72%	100%
	Tır/Kamyon	0%	30%	99%
	Petrol ürünlerinde biyoyakıt karışımı	5%	13%	41%
Demiryolu Taşımacılığı				
Toplam enerji tüketiminde elektrik ve hidrojenin payı		43%	65%	96%
Mod kayması nedeniyle etkinlik artışı (indeks 2020=100)		100	100	130
Havayolu Taşımacılığı				
Sentetik hidrojen bazlı yakıtlar, toplam havacılık enerjisi tüketimindeki payı		0%	2%	33%
Davranış ölçümlerinden kaçınılan talep (indeks 2020=100)		0	20	38
Denizyolu Taşımacılığı				
Toplam yük taşımacılığı kaynaklı enerji tüketimindeki pay: Amonyak		0%	8%	46%
Hidrojen		0%	2%	17%
Biyoenerji		0%	7%	21%
Altyapı				
Kamuya açık EV şarjı (milyon adet)		1,3	40	200
Hidrojen yakıt ikmal üniteleri		540	18000	90000
Elektrikli demiryolu hatlarının payı		34%	47%	65%

NSE hedeflerinin gerektirdiği emisyon azaltımlarını elde etmek için hükümetlerin ayrıca yeni içten yanmalı motorlu araç satışlarının sona erdiğini bildirmek için hızlı hareket etmesi gerekmektedir. Erken taahhütler, özel sektörün yeni aktarma organlarına, ilgili tedarik zincirlerine ve yakıt ikmal altyapısına gerekli yatırımı yapmasına yardımcı olacaktır. Bu durum uzun vadeli planlama gerektiren pil metallerinin tedariki için de özellikle önemlidir (IEA, 2021).

Ağır kamyonlar için bataryalı elektrikli kamyonlar piyasaya yeni çıkmaya başlamasıyla birlikte yakıt hücreli elektrik teknolojilerinin de önümüzdeki birkaç yıl içinde piyasaya çıkması beklenmektedir. Kamyon üreticileriyle işbirliği içinde çalışan hükümetler, bataryalı ve yakıt hücreli elektrikli kamyonların hızlı bir şekilde ticari olarak benimsenmesine öncelik vermek için yakın vadede adımlar atabilecektir. 2030'a kadar yatırımcılara Ar-Ge yönlendirme ve stratejik altyapı konumlandırması için yeterli zaman sağlamak ve böylece 2030'larda büyük ölçekli yatırımlar için bu teknolojilerin rekabetçi ortama çekilmesi gerekmektedir (Cunanan, Tran, Lee, Kwok, Leung ve Fowler, 2021).

Filoların yavaş devir hızı göz önüne alındığında, hükümetlerin denizcilik ve havacılıkta düşük karbonlu yakıtlara yönelik stratejilerini en geç 2025 yılına kadar belirlemeleri ve ardından hızla uygulamaları gerekmektedir. Öncelikli eylem olarak ilk yatırımın etkisini en üst düzeye çıkarmak için en yoğun şekilde kullanılan limanlar ve havaalanları hedeflenebilir.

Karayolu taşımacılığında çeşitli yakıtların kullanılması, NSE hedeflerinin temel bir bileşenidir. Bununla birlikte, özellikle FCEV'ler ve gelişmiş biyoyakıtlar gibi diğer teknolojiler öngörüldüğü gibi gelişmezse, hükümetlerin ulaştırma sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmak için tamamen elektrikli bir rotayı düşünmesi gerekebilecektir. Bu nedenle hem pil teknolojisi hem de enerji arz güvenliği çerçevesinde elektrik arzında daha hızlı ve etkin politikalara ihtiyaç duyulacaktır. Bu anlamda Dünya genelinde elektrikli araçları desteklemek için altmış beş milyonun üzerinde halka açık şarj cihazına ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir (IEA, 2021b).

3. LİTERATÜR TARAMASI

Enerji modelleri, küresel veya ülke ve bölge ölçeğinde enerji talebinin ve arzının geleceğini tahmin etmek için kullanılır. Bu tahminler için mevcut enerji dengesinden yola çıkarak makroekonomik faaliyetlerin gelişimi, nüfustaki değişim, enerji emtia fiyatlarının gelişimi gibi bazı girdiler ve bu girdilerin bazı varsayımları kullanılmaktadır. Modellerin sonuçları gelecekteki enerji ve iklim değişikliği politikalarını, teknoloji değişikliklerini, yeni gerekli yatırımları ve enerji arz güvenliğini değerlendirmektedir. Enerji modellemenin tarihi 1960'lara kadar gitmesine rağmen modelleme geliştirme çabaları 1973'teki ilk petrol kriziyle başlamıştır. Bu olaydan kaynaklanan enerji sorunlarına ilişkin artan farkındalık, enerji modellerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır (Tsani ve Kozlova, 2021).

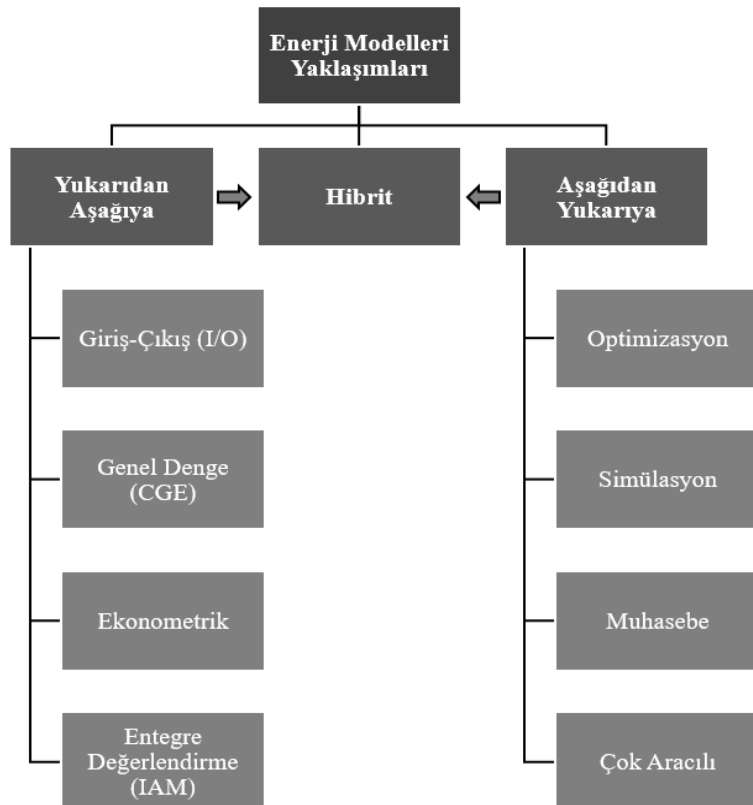
Enerji talebini ekonomik bir şekilde yerine getirme sorununu çözmek için iki zıt modelleme türü geliştirilmiştir: Bunlar aşağıdan yukarıya mühendislik yaklaşımı ve yukarıdan aşağıya makroekonomik yaklaşımıdır (Hourcade, Jaccard, Bataille ve Gherzi, 2006). Bu modeller hedef gruplarına (politika belirleyiciler, bilimsel ve araştırma toplulukları), kullanım amaçlarına (veri analizi, projeksiyon, simülasyon, optimizasyon, parametrelerin tahmini vs.), bölgesel kapsamlarına (bölgesel, ulusal, küresel), kavramsal çerçevelerine (“yukardan aşağıya”, “aşağıdan yukarıya”) ve mevcut bilgiye göre değişiklik göstermektedir (Herbst, Toro, Reitze ve Jochem, 2012). Ekonominin diğer kısımları ile ilişkisi tam dikkate alınmayarak sadece enerji sektörünün detaylarına odaklanan modeller, aşağıdan yukarıya modeller olarak sınıflandırılmakta ve önemli miktarda enerji teknolojisini, emtiayı, süreç ikamesini ve iyileştirmelerini içeren detaylı mühendislik tabanlı modeller olmaktadır (Löschel, 2002). Yukarıdan aşağıya modeller ise sistemin toplam ekonomik değişkenlerden değerlendirilmesini yapmakta; sektörel ve teknolojik detayları dikkate almamaktadır (Nakata, 2004).

Ekonomik çalışmalar, makroekonominin toplu davranışını analiz eden yukarıdan aşağıya modelleri kullanırken, aşağıdan yukarıya modeller teknolojileri ön plana alarak ayrıştırılmış yaklaşımları dikkate alır ve enerji sektörünü de veri odaklı geniş bir çerçevede ele alır (Grubb, Joe, Brick ve Morrison, 1993).

Çizelge 3.1. Yukarıdan-aşağıya ve aşağıdan-yukarıya modelleme özellikleri

Yukarıdan Aşağıya Modeller	Aşağıdan Yukarıya Modeller
Ekonomik bir bakış açısı kullanır	Mühendislik yöntemi kullanır
Teknolojilerin temsili yoktur	Yüksek teknolojik detay seviyesi vardır
Piyasa tarafından benimsenen mevcut teknolojileri yansıtır	Teknik potansiyeli yansıtır
Tahmin için toplu verileri kullanır	Tahmin için ayrıştırılmış verileri kullanır
Gözlemlenen piyasa davranışına dayalıdır	Gözlemlenen piyasa davranışından bağımsızdır
Mevcut teknik olarak en verimli teknolojileri göz ardı eder, verimlilik iyileştirmeleri potansiyelini dikkate almaz	Piyasa eşiklerini (gizli maliyetler ve diğer kısıtlamalar) dikkate almayarak verimlilik iyileştirmeleri potansiyelini yükseltir
Tarihsel eğilimlerde süreksizlik olmadığını varsayar	Enerji sektörü ile ekonominin diğer sektörleri arasındaki etkileşimler dikkate alınmaz
Enerji talebini toplam ekonomik endeksler aracılığıyla belirler, ancak enerji arzını ele almada farklılık gösterir	Ayrıştırılmış verileri kullanarak tedarik teknolojilerini yüksek ayrıntılarla temsil eder; enerji tüketimini ele almada farklılık gösterir
Davranışsal ilişkileri endojenize eder	Teknolojik seçeneklerin maliyetlerini doğrudan değerlendirir

Modelleme kavramlarının farklılıkları olması nedeniyle, çeşitli çalışmalar hibrit modelleme sistemleri oluşturmak için modelleri birleştirmeye odaklanmıştır (Böhringer and Rutherford 2006). Hourcade, Jaccard, Bataille ve Gherzi (2006), yukarıdan aşağıya modellerin ve aşağıdan yukarıya modellerin önemli özelliklerini içeren ideal bir hibrit modeli tanımlamakta ve tüm bu kavramları üç boyutlu bir bölge üzerinde şematize etmektedir.



Şekil 3.1. Enerji modelleri yaklaşımları

3.1. Aşağıdan Yukarıya Modeller

Herbs ve diğerleri (2012) tarafından belirtildiği üzere yukarıdan aşağıya enerji modellerine kıyasla tipik bir aşağıdan yukarıya enerji modelinin temel özelliği, gelecekteki enerji dengesini tahmin etmek için kullanılan yüksek teknolojik ayrıntı seviyesidir. Bunlar çoğunlukla enerji politikalarının veya ilgili yatırımların makroekonomik etkilerini ve yukarıdan aşağıya modellerde kapsamlı bir şekilde analiz edilen maliyetlerini göz önünde bulunduramazlar. Özellikle enerji sektörü kapsamında kullanıldığı için bu modellerde enerji arz ve talep istatistikleri kullanılır (Van Beeck, 1999). Böhringer ve Rutherford (2008) tarafından belirtilen aşağıdan yukarıya enerji modelleri, gelecekteki birçok enerji planlamasında olduğu gibi bazı teknik sınırlamalar ve emisyon kısıtlaması gibi politika kısıtlamaları altında nihai enerji için gerekli talep değerini sağlamak için enerji sisteminin maliyet azaltma seçeneklerini değerlendirmektedir. Bu tür modeller dört ana uygulamaya ayrılmaktadır (Herbst, Toro, Reitze ve Jochem, 2012):

- Optimizasyon modelleri
- Simülasyon modelleri
- Muhasebe modelleri
- Çok aracı modeller

Çizelge 3.2’de enerji talebinin çoğunu kapsayan farklı türlerdeki aşağıdan yukarıya modelleme örnekleri verilmektedir (Fleiter, Worrell ve Eichhammer, 2011).

Çizelge 3.2. Aşağıdan yukarıya modeller

Model Türü	Model
Optimizasyon Modelleri	ENERGYPLAN, IKARUS, MESSAGE, PRIMES, TIMES/MARKAL
Simülasyon Modelleri	ENPEP, INFORSE, LEAP, MESAP PLANET, POLES
Muhasebe Modelleri	MAED, MED-PRO, MURE
Çok aracı modeller	LIBEMOD MULTIMOD

3.1.1. Optimizasyon Modelleri

Bu modeller, maliyet minimizasyonu yoluyla enerji yatırım kararlarını optimize etmek için geliştirilmiştir ve en az maliyetli çözümler sunan teknolojileri ve süreçleri kullanarak toplam

sistemi en az maliyete indirmeyi hedeflemektedir. Bu modeller, kapsanan sektörlerdeki talep ve arzı dengeledikleri için kısmi denge modelleri olarak da kategorize edilebilirler.

MARKAL, IEA'nın Enerji Teknolojisi Sistemleri Analiz Programı (ETSAP) tarafından geliştirilen aşağıdan yukarıya optimizasyon modellerinden olup dinamik doğrusal programlama (LP) yöntemi temelinde çalışmaktadır. MARKAL, bir enerji sisteminin tüm seviyelerinde yani birincil ve ikincil enerji kaynaklarına göre enerji dengesini ortaya çıkarmaktadır. Modelin temel amacı gerekli enerji hizmetlerini minimum maliyetle sağlamaktır (Loulou, Goldstein ve Noble, 2004).

TIMES, IEA-ETSAP (Enerji Teknolojisi Sistemleri Analiz Programı) kapsamında geliştirilmiştir. TIMES, MARKAL'a benzer şekilde, enerji modellemesinde yaygın olarak kullanılmakta olup benzer şekilde çeşitli girdilerin miktarları ve fiyatları modelde dengelenmektedir (Loulou, Goldstein, Kanudia, Lettila ve Remme, 2016).

MESSAGE (The Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental), Uluslararası Uygulamalı Sistem Analizi Enstitüsü (IIASA) tarafından geliştirilen enerji arzı ve talebinin optimizasyonu için kullanılan dinamik bir doğrusal programlama modelidir. Model, enerji talebinin diğer optimizasyon modelleri gibi toplam sistem maliyetlerini en aza indirgeyerek belirli bir tedarik seçenekleri kümesiyle karşılanması gereken enerji sistemlerini bir bütün olarak değerlendirmektedir (Messner ve Strubegger 1995).

PRIMES (Fiyat Kaynaklı Piyasa Denge Sistemi) enerji sistemi modeli, Atina Ulusal Teknik Üniversitesi'ndeki Enerji-Ekonomi-Çevre Modelleme Laboratuvarı tarafından geliştirilmiştir. Model enerji talebi, enerji arzı, fiyatlar ve gelecekteki teknoloji yatırımlarının geniş kapsamlı tahminlerini sunmakta ve emisyonları içeren tüm enerji sistemini kapsamaktadır. Enerji ve emisyonlar için çeşitli piyasalarda aynı anda talep ve arzı dengelemenin bir aracı olarak fiyatlara odaklanmakta ve model piyasa denge hacimlerini belirlemektedir. PRIMES bir yukarıdan aşağıya model olmadığı için makroekonomik denge analizi yapamamaktadır. Bu amaçla makroekonomik bir modelle birleştirilmesi gerekebilmektedir (E3MLAB, 2018).

3.1.2. Simülasyon modelleri

Simülasyon modelleri, optimizasyon modellerin aksine maliyeti en aza indirgeyen bir modeli takip etmeyen projeksiyonlar yapmaya çalışmaktadır (Herbst, Toro, Reitze ve Jochem, 2012). Modelleme yönleri, saf optimizasyon çerçevesinden ayrılmakta ve ekonometrik olarak tahmin edilen ilişkileri içerebilmektedirler. Büyük simülasyon modelleri kısmi optimizasyon içerebilir (örneğin şirket perspektifinden) ve daha fazla yönü kapsayan farklı modüllerden oluşabilmektedir. Bu modeller gelir, enerji arz güvenliği, enerji politikaları, emisyonlar ve enerji fiyatları gibi çeşitli değişkenleri göz önünde bulundurarak teknoloji seçimi için son kullanıcı davranışını tekrarlamaya çalışmaktadır (Mundaca ve Neij 2009). Simülasyon modelleri çok geniş ve heterojen bir grup oluşturmaktadır.

MIDAS ve POLES iyi bilinen simülasyon modellerindendir. IEA tarafından "Dünya Enerji Görünümü" için uzun vadeli enerji modellemesi yapmak için kullanılan Dünya Enerji Modeli (WEM), enerji piyasalarının nasıl işlediğini görmek için kullanılan bir simülasyon modelidir. Model sektörel ve bölgesel düzeyde yüksek derecede enerji projeksiyonu sağlamaktadır (IEA, 2019).

3.1.3. Muhasebe modelleri

Muhasebe modelleri, enerjinin fiziksel iletimini hesaba katmak için tasarlanmıştır. Muhasebe modelleri, kullanıcıların enerji sisteminde sonuçları belirlemelerini gerektirir (Mundaca ve Neij, 2009). Sektörel yaklaşımlara ihtiyaç duyulduğunda muhasebe modelleri genellikle tercih edilmektedir (Bhattacharyya ve Timilsina 2009). Muhasebe modelleri daha az dinamiktir ve enerji fiyatlarını dikkate almaz. Bu modellerde esas olarak teknik gelişim üzerine dışsal varsayımlar uygulanır. Aşağıdan Yukarıya Enerji Analiz Sistemi (BUENAS); Enerji Talebi Analizi Modeli (MAED) ve Politika Analizi Modelleme Sistemi (PAMS), yaygın olarak kullanılan muhasebe tipi modellerdendir.

3.1.4. Çok aralı modeller

Çok aralı modeller daha fazla aralı tarafından eşzamanlı optimizasyonu içerdikleri için optimizasyon modellerinden daha geniş bir modelleme sınıfıdır.

3.2. Yukarıdan Aşağıya Modeller

Aşağıdan yukarıya modellemenin aksine, bu modeller ilgili enerji dengesini yansıtmak için ekonominin toplam bir görünümünü dikkate almaktadır (Herbst, Toro, Reitze ve Jochem, 2012). Bu modeller enerji sektörünün yüksek teknoloji seviyesi ile ilgilenmemektedir. Enerji ve diğer sektörler çoğunlukla üretim fonksiyonları aracılığıyla toplam olarak temsil edilmektedir (Böhringer ve Rutherford, 2006). Yukarıdan aşağıya modellerde enerji, ekonominin diğer tüm sektörleri gibi bir girdidir. Bu nedenle yukarıdan aşağıya enerji sistemi modelleri, aşağıdan yukarıya bir modelde dikkate alınmayan sektörler arası bağlantıları analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu tür ara bağlantıların modellenmesi, modelleyicinin enerjinin ekonominin diğer sektörleri üzerindeki etkisini daha iyi analiz etmesini sağlar (Subramarian, Gundersen ve Adams, 2018). Çeşitli tipte yukarıdan aşağıya model konseptleri mevcuttur. Bazı örnekler ekonometrik modeller, hesaplanabilir genel denge modelleri ve giriş-çıkış modelleri (I/O) olarak verilebilir.

3.2.1. Giriş-Çıkış (I/O) modelleri

Giriş-çıkış model türleri ilk olarak 1930'ların sonlarında Profesör Wassily Leontief tarafından geliştirilmiştir. Girdi-çıkış analizinde kullanılan temel bilgi, her sanayi sektöründen, üretici olarak diğer sektörlerin her birine, tüketici olarak ürünlerin akışıdır. Bu bilgi, tablo satırlarının bir üreticinin çıktısının ekonomi boyunca dağılımını tanımladığı doğrusal denklemlerden oluşan ve sütunların belirli bir endüstrinin çıktısını üretmek için ihtiyaç duyduğu girdilerin bileşimini tanımladığı doğrusal denklemlerden oluşan sektörler arası işlemler tablosunda yer almaktadır (Miller ve Blair, 2009). Bu doğrultuda bir ekonomik sektörün çıktısı bir başkasının girdisi olabilmekte, böylece sektörel ilişkileri incelemeyi sağlayan farklı ekonomik sektörler arasındaki bu girdi-çıkış bağlantılarını analiz etmektedir (Subramarian, Gundersen ve Adams, 2018). Bu model yaklaşımında kullanılan tablolar, sanayi ve hizmet sektörleri için detaylandırılmıştır ve genellikle kısa vadeli projeksiyonlarda ekonomik veya enerji politikalarından kaynaklanan ekonomik yapıdaki değişiklikleri üretmek için katma değer başına istihdam gibi ekonomik göstergeler aracılığıyla kullanılmaktadır. Tablolardaki veriler zamanla değişmediğinden, bu model teknolojik gelişmeyi göz ardı eden kısa vadeli projeksiyonlar için kullanılabilir (Catenazzi, 2009). Bu model enerji ekonomisi tahmin yaklaşımında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, Sasai (2010), I/O tablosuna dayanan dinamik ekonometrik modelin üç varsayıma

dayanarak ekonomik faaliyetlerin neden olduğu CO₂ emisyon miktarını tahmin etmek için en uygun yöntem olduğunu düşünmektedir. Birincisi, CO₂ emisyonu endüstriyel üretim ile yakından bağlantılıdır. İkincisi CO₂ emisyonunun miktarı endüstride kullanılan her enerji kaynağının tüketimine bağlıdır. Üçüncü olarak ise ekonomik büyümeye karşılık gelen endüstriyel yapının evrimi uygun şekilde dahil edilmelidir (Sasai, 2010).

I/O modelleri, ABD Ekonomik Analiz Bürosu tarafından endüstriler ve emtialar arasındaki üretim ilişkilerini göstermek için de kullanılır ve girdi-çıktı verileri her yıl güncellenir ve 71 endüstri kategorisi hakkında bilgi sağlar (U.S. Department of Commerce, 1992).

3.2.2. Hesaplanabilir genel denge (CGE) modelleri

Bu tür modeller genellikle tüm piyasaların mükemmel dengede olduğunu varsayar. Politika müdahalesinden sonra denge, daha sonraki değişkenler tarafından değiştirilemeyen fiyat düzenlemesi yoluyla korunur (Herbst, Toro, Reitze ve Jochem, 2012). CGE modelleri tipik olarak arz ve talep davranışını belirten denklemlerle ürün faktörleri ve döviz için piyasaları simüle eder (Nakata, 2004).

Modeller piyasa izni-açıklığı, sıfır kar ve gelir dengesi olmak üzere üç genel denge koşulunu kullanır (Kat, 2011). Bu modeller toplu üretim fonksiyonları ve tüketicilerin fayda fonksiyonları aracılığıyla ekonominin çeşitli sektörlerini tanımlayan ayrıntılı bir denklem setine sahiptirler (Ortiz ve Markandya, 2009).

Enerji ekonomisi politika modellemesi, yukarıdan aşağıya modelleme yaklaşımında CGE modellerinin hâkimiyetinde olmasına rağmen, genel olarak diğer yukarıdan aşağıya modellerde olduğu gibi, teknolojik esnekliği sağlamamaktadır (Hourcade, 2006). Bununla birlikte, Nam, Selin, Reilly ve Paltsev (2010) tarafından belirtilen CGE'nin en büyük avantajlarından ikisi, modelin ekonomik dinamikleri (tasarruf ve yatırım) ve kayıp işgücünün, boş zamanın ve ek taleplerin yeniden tahsis etkilerini birden fazla senaryo oluşturmaya izin vererek tanımlama yeteneğidir.

İyi bilinen bir CGE modeli GEM-E3'tür (Ekonomi Enerji Ortamı için Genel Denge Modeli). Bu model ekonomiyi çevre ve enerji sistemi ile ilişkilendiren dinamik, çok sektörlü bir genel denge modelidir (Capros, Georgakopoulos, Zografakis ve Proost, 1996b). Model, birbiriyle

ilişkili tüm piyasaları aynı anda içerir ve sistemi coğrafya, alt sistem (enerji, çevre, ekonomi) ve gizli maliyetlerin davranışının dinamik mekanizmaları açısından uygun düzeyde temsil eder. Model dinamik, zaman içinde özyinelemeli, sermaye ve ekipman birikimi tarafından yönlendirilebilir yeteneklere sahiptir. Capros ve diğerleri (2018), AB düzeyinde karbon vergisini ve GSYH üzerindeki etkisini tanıtmak için modeli kullanmıştır.

GEMINI-E3 Fransız Ulaştırma ve Konut Bakanlığı ve Fransız Atom Enerjisi Ajansı arasındaki işbirliği ile geliştirilen tipik bir CGE modelidir. Model Kyoto Protokolü'ne taraf olan ülkelerin ve gelişmekte olan ülkelerin refahı üzerindeki karbon vergisini anlamak için kullanılmıştır (Bernard ve Vielle, 2003) .

GREEN (GeneRal Equilibrium ENvironmental Model), karbon emisyonlarına sınır getirilmesinin ekonomik etkilerini değerlendirmek amacıyla OECD Sekreterliği tarafından geliştirilmiştir (OECD, 1994). Model özyinelemeli-dinamik bir küresel CGE modelidir. Modelin her dönemi, enerji üretimi ve tüketimine özel bir odaklanma ile tek bir dönem modeli olarak çözülür (Nakata, 2004). Model, fosil yakıtların tüketimi, enerji üretimi ve kullanımı ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi vurgulamaktadır (Burniaux, Nicoletti, Martins ve Martin, 1992).

RICE (Bölgesel Entegre İklim ve Ekonomi Modeli) modeli, iklim ve ekonominin dinamik ve çok bölgeli genel denge modelidir ve ekonomik faaliyeti, sera gazı emisyonları ve iklim değişikliği ile bütünleştirmektedir. Model, dünya ekonomisini 10 bölgeye ayırmakta ve her biri başlangıç sermayesi stoku, nüfus ve teknoloji ile donatmaktadır. Nüfus ve teknoloji artışı, modellemek için dışsal olarak verilirken, sermaye zaman içindeki tüketim akışı tarafından belirlenir. Model de üç farklı strateji altında çalışılmaktadır: Piyasa politikası, işbirliği politikası ve işbirliği olmayan politika seçenekleri (Nordhaus ve Yang, 1997).

3.2.3. Ekonometrik modeller

Ekonometrik modeller denge varsayımları olmadan ekonometrik olarak tahmin edilen denklemlerden oluşmaktadır. Makro ekonometrik modeller çok fazla ekonomik ayrıntı içerebilmekte ancak çok az yapısal ayrıntı sağlamaktadır. Bu nedenle kısa vadeli veya orta vadeli değerlendirme ve tahmin için iyi tasarlandıkları değerlendirilmektedir (Löschel, 2002). Herbs ve diğerleri (2012), ekonometrik modelin en büyük dezavantajı olarak aşırı

makro-ekonomik verilere büyük ölçüde bağımlı oldukları için bazı ülkelere yönelik verilerin mevcut olmayabileceği çok ülkeli analizler söz konusu olduğunda, model çıktılarının güvenilirliğini ve yeterliliğini bozabilecek yüzeysel tahminler gerektirebileceğine dikkat çekmiştir.

E3ME (Avrupa için Enerji-Çevre-Ekonomi Modeli), ara talebi temsil etmek için giriş-çıkış tablolarını içeren zaman serileri ve kesit verileri üzerinde ekonometrik yöntemler kullanır. Barker (1999) tarafından, tüketim vergisi uygulayarak AB'nin 11 Üye Devletinde CO₂ emisyonlarını % 10 oranında azaltmak için kullanılmıştır.

E3MG (Dünyanın Enerji-Çevre-Ekonomi Modeli), E3ME'nin gelişmiş bir versiyonudur. Esas olarak elektrik üretimi için 26 enerji teknolojisini temsil eden bir enerji teknolojisi modelini (ETM) içerecek şekilde geliştirilmiştir. Bu hibrit model, teknolojik değişimi makro ekonomide endojen olarak ele almaktadır. Modelin amacı, 2100 yılına kadar dünya genelinde düşük karbonlu toplumlara geçişin ekonomisini simüle etmek ve enerji ve ulaşımın sera gazı emisyonlarının iki ana kaynağı olduğunu dikkate alarak modelin bu sektörleri açıkça analiz etmeyi amaçladığı belirtilmiştir (Köhler, Barker, Anderson ve Haoran, 2006).

3.2.4. Entegre değerlendirme modelleri (IAM'ler)

Kelly ve Kolstad (1998) temel olarak IAM'leri iklim değişikliğinin bilimsel ve ekonomik yönlerini birleştiren modeller olarak açıklamaktadır. Weyant, Davidson, Dowlatabadi, Edmonds, Grubb, Richels, Rotmans, Shukla, Cline, Fankhauser ve Tol (1996) tarafından IAM'lerin

- i) İklim değişikliğine potansiyel tepkileri değerlendirmek,
- ii) Yanıtların önlenmesinin maliyetlerini karşılaştırmak
- iii) Yanıtların göreceli etkinliğini karşılaştırmak

için üç amaca hizmet edebileceği vurgulanmaktadır. IAM'lerin enerji-çevre modellemesinde kullanılmasının avantajları, çevresel etkiler ile sosyal tepki arasındaki etkileşimlerin entegre analizidir. Bu modeller temel bilgidaki zayıflıklar ve verimli modelleme ve simülasyon için sınırlı olmaları nedeniyle eleştirilmektedir (Davies ve Simonovic, 2010). Diğer taraftan Ackerman, Decanio, Howarth ve Sheeran (2009), IAM'lerin kısa vadeli finansal analiz için

iyi bir çözüm olabileceğini ancak iklim azaltma maliyetlerini aşırı tahmin etme riski oluşturduklarını belirtmişlerdir.

ANEMI (Sosyal-Enerji Ekonomik-İklimsel Sistemin Davranışını Analiz Etmek İçin Entegre Bir Sistem Dinamiği Modeli), yatay olarak entegre edilmiş bir IAM modeli olup iklim değişikliği ile diğer fiziksel ve sosyo-ekonomik konular arasındaki bağlantılara odaklanır. Model iklim, karbon döngüsü, ekonomi, arazi kullanımı, nüfus vb. gibi sekiz bireysel, yatay olarak entegre edilmiş bileşenden oluşmaktadır. Her sektör bir sistem dinamiği modelini temsil eder ve geri bildirim bağlantıları yoluyla diğer sektörlerle bağlanan gelecek projeksiyonları yapmak yerine bir sistem içinde temel bağlantılar kurmaktır (Davies ve Simonovic, 2010) .

DICE (İklim ve Ekonominin Dinamik Entegre Modeli), bazı farklılıklarla RICE modeli ile büyük benzerliklere sahiptir. Örneğin nüfus, ekonomi çapında teknolojik değişim, işgücü girdileri, yatırım ve sermaye stoku için modelleme yapısı aynıdır ve DICE küresel olarak toplanan büyüklükleri temsil ederken, RICE bu değişkenlerin her birini her bölge için ayrı ayrı dikkate almaktadır (Nordhaus ve Boyer, 2000). Gelecekteki tüketimi artırmak için, araçlar eğitime, teknolojiye ve sermayeye yatırım yapma eğilimindedir ve emisyonlarda, sermaye stokunda ve teknolojide tek bir çıktıyı toplamaktadır. Küresel toplamalar, dünya sera gazı emisyonlarının %94'ünü ve nüfusun %86'sını temsil eden 71 ülkenin verilerinden tahmin edilmektedir (Ortiz ve Markandya, 2009). Her iki modelde de, sera gazı birikimi negatif sermaye olarak kabul edilir ve böylece herhangi bir emisyon azaltımı bu negatif sermayeyi düşürmek olarak görülür (Nordhaus ve Boyer, 2000) .

WITCH (The World Induced Technical Change Hybrid), 12 makro bölgeye bölünmüş küresel bir modeldir ve hibrit bir spesifikasyona sahip olması için aşağıdan yukarıya model olarak çalışan bir enerji giriş karakteri içeren yukarıdan aşağıya modeldir (Bosetti, Carraro, Galeotti, Massetti ve Tavoni, 2007). Model, dünyanın 12 bölgesindeki karşılıklı bağımlılıkları ve yayılmaları göz önünde bulundurur. Endojen teknik değişim ve oyun-teorisi kurulum olmak üzere iki özelliğe sahiptir. İlk olarak, karbon azaltma teknolojileri Ar-Ge ve kamu yatırım stratejileri aracılığıyla modele entegre edilebilir. İkincisi model uygulayıcıya her bölge için işbirlikçi (küresel olarak optimal çözüm) veya işbirlikçi olmayan (merkezi olmayan) iki farklı çözüm üretmesine izin verir. Bu nedenle, bağlantılı bakış

açısıyla küresel bir emisyon azaltma politikası elde edilebilmektedir (Bosetti, Carraro, Galeotti, Massetti ve Tavoni, 2007).

MIND (Model of INvestment and Technological Development), WITCH'e benzer endojen teknik değişimle birleşmiş bir IAM'dir. Enerji ve işgücü verimliliği için ayrı Ar-Ge sektörleri ekleyerek, enerjideki fiziksel sermaye stokunu farklılaştırarak ve iklim azaltma seçenekleri arasında bir karşılaştırma yapılmasına izin vererek endojen teknik değişimi iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Model, farklı azaltma seçeneklerine yapılan yatırımların refah kayıpları açısından ölçülen iklim korumasının genel makroekonomik maliyetleri üzerindeki etkisini hesaplamaktadır (Edenhofer, Bauer ve Kriegler, 2005).

3.3. Hibrit Modeller

Önceki bölümlerde yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya modellerin avantaj ve dezavantajları tartışılmaktadır. Özetlemek gerekirse, yukarıdan aşağıya modeller, teknoloji detayı eksikliği ile yüksek derecede makroekonomik bütünlük sağlarken, aşağıdan yukarıya modeller, yüksek derecede teknolojik detaylar ve düşük düzeyde makroekonomik bütünlük sağlamaktadır (Herbst, Toro, Reitze ve Jochem, 2012). Enerji ekonomisi ve çevre modellemesindeki bu iki yaklaşımın zayıflığının ve dezavantajlarının üstesinden gelmek için, modellemeciler bunları birleştirme eğilimindedir. Örneğin, bazı aşağıdan yukarıya model kullanıcıları modellerine makroekonomik geri bildirimler eklerken, yukarıdan aşağıya araştırmacılar modellerine enerji arzında teknolojik değişim modülleri eklemişlerdir (Hourcade, Jaccard, Bataille ve Gherzi, 2006). Bu kombinasyon karmaşık ve matematiksel olarak ele alınması zor olan mevcut iki büyük yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya modelin (yumuşak bağlantı) birleştirilmesiyle veya aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya özelliklere (sert bağlantı) sahip tek bir modelle birleştirilerek yapılabilir (Böhringer ve Rutherford 2006). Hibrit modelleme örneklerinden bazıları şu şekildedir.

NEMS (Ulusal Enerji Modelleme Sistemi), ABD Enerji Bilgi İdaresi (EIA) tarafından alternatif enerji politikalarının ve enerji piyasaları hakkındaki farklı varsayımların ABD üzerindeki enerji, ekonomik, çevresel ve güvenlik etkilerini yansıtmak için kullanılan bir enerji-ekonomik denge modelidir (EIA, 2023). Optimizasyon, simülasyon (her talep sektörü için) ve genel bir denge sistemi sağlayan muhasebe bileşenlerini birleştirir (Mundaca, Neij, Worrell ve McNeil, 2010).

MARKAL-MAKRO, detaylı mühendislik modeli ile uzun vadeli makroekonomik büyüme modelinin birleşimine iyi bir örnektir. Maliyetleri tahmin etmek ve ABD verilerine dayanarak küresel iklim değişikliği veya bölgesel hava kirliliği gibi çevresel riskleri azaltmak için önerilen teknolojileri analiz etmek için tasarlanmıştır. Emisyon azaltma politikalarının toplam ekonomik faaliyet düzeyi ve enerji talepleri üzerindeki dolaylı etkisini analiz etmeyi sağlamaktadır (Manne ve Wene, 1992).

CIMS (Kanada Entegre Modelleme Sistemi) temel olarak yukarıda açıklanan NEMS modelinin öncüsü olarak tasarlanmıştır. CIMS, enerji arzı, enerji talebi ve makro ekonomi olmak üzere üç modül içerir. Model, makro-ekonomi, enerji dengesi modülleri arasında, birbirleri arasındaki denge sağlanana kadar her zaman aralığında yinelenir. CIMS, sektörel alt modellerinin her birinde yüksek düzeyde teknolojik detay içerir ancak gelecekteki teknolojiler bakımından eksik kalmaktadır. Model ayrıca, her alt sektördeki makroekonomik faaliyetin tahmini hakkında dışsal veri girişi gerektirmektedir (Bataille, Wolinetz, Peters ve Bennett, 2009).

3.4. Çalışma Kapsamında Benzer Modelleme Çalışmaları

Günümüzde ülkeler, 2050'li yılları kapsayan uzun vadeli emisyon azaltım hedeflerini hızla açıklamaktadır. Bu doğrultuda, bu hedeflere önemli girdiler sağlamak için çalışmalar yapılmaktadır. Türkiye'nin net sıfır emisyon hedefi Kasım 2021'de resmîyet kazanmıştır. Ulaştırma sektöründe emisyon azaltımına yönelik bazı çalışmalar olsa da bu çalışma literatürde bu hedef için yapılan ilk akademik çalışmalardan biridir. Türkiye için yapılan emisyon azaltım çalışmalarının yanı sıra net sıfır emisyon hedeflerine yönelik akademik çalışmaların da ilerleyen yıllarda artacağı değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, bu bölümde hem bu çalışmaya hem de diğer çalışmalara önemli girdiler sağlayacak literatür incelenmektedir.

Avrupa Komisyonu, Yeşil Anlaşma paketinin bir parçası olarak bir politika belgesi hazırladı. Bu belgede, 2050 yılına kadar net sıfır emisyonu taahhüt etmekte ve Avrupa İklim Yasası'nın önerisine ve 2030 yılına kadar %55'lik bir sera gazı azaltımını hedefleyen ayrıntılı etki değerlendirmesine atıfta bulunmaktadır (EC, 2020a). Etki Değerlendirmesi, PRIMES modeli aracılığıyla Avrupa enerji sistemi için gelecek projeksiyonları sağlamaktadır (Capros, Kannavou, Evangelopoulou, Petropoulos, Siskos, Tasios, Zazias ve DeVita, 2018).

Yüzyılın ortalarında Avrupa'da CO₂ net nötrlüğüne ulaşmak için aranan alternatif rotalar için kullanılan PRIMES modelinde yolcu ve yük taşımacılığı ile tüm taşıma modları (karayolu, demiryolu, havacılık, iç navigasyon) değerlendirilmiştir. Her ulaşım modu, çeşitli araç teknolojileri ve yakıt seçenekleri ile karakterize edilmektedir. Modelde, elektrik ve hidrojenin yanı sıra LPG, CNG, LNG ve biyoyakıtlar alternatif yakıt altyapısını temsil ederken, menzil kaygısı da dahil olmak üzere davranışsal unsurlar da simüle edilmektedir (Rodrigues ve diğerleri, 2022).

PRIMES enerji sistemi modeli, sera gazı emisyonlarının 2050 yılına kadar AB'de %80 oranında azaldığı çeşitli senaryoları değerlendirmek için kullanılmıştır (AB, 2016). 29 Avrupa ülkelerinin yanı sıra Kuzey Afrika ve Orta Doğu'daki ülkeleri içeren bir başka model olan LIME-EU+, 2050 yılına kadar % 90'lık bir emisyon azaltımını incelemek için kullanılmıştır (Haller, Ludig, ve Bauer, 2012).

Elesplan-m güç sistemi modeli, elektrik sektöründeki sera gazı emisyonlarını 2050 yılına kadar 1990'a kıyasla % 98,4 oranında azaltmak ve tüm ENTSO-E üye devletleri için 2050'ye doğru uygun maliyetli yolları incelemek için kullanılmıştır (Plessmann ve Blechinger, 2017). AB Komisyonu tarafından görevlendirilen PRIMES çalışması, 2018 AB İklim ve Enerji Paketi 2030'u (EC, 2017) incelemektedir.

PRIMES enerji modelini kullanan çalışma, AB28 enerji ve ekonomik sisteminin 2050'ye kadar karbonsuzlaştırma yolu altında dönüşümünü araştırmakta ve Avrupa'nın karbonsuzlaştırma yolunun makroekonomik sonuçlarını iki farklı küresel iklim eylemi yörüngesi altında değerlendirmektedir (Vrontisi, Fragkiadakis, Kannavou ve Capros, 2020).

AB'nin yüzyılın ortalarına kadar iklim nötrlüğüne ulaşması için ulaştırma sektörünü karbondan arındırması gerektiğinin belirtildiği çalışmada, elektrifikasyon, biyoyakıtlar, hidrojen ve e-yakıtlar (sentetik yakıtlar) geçiş seçenekleri olarak değerlendirilmiş ve AB ulaştırma sektörünün karbonsuzlaştırma potansiyeli ortaya konulmuştur. Bunu yapmak için, PRIMES-TREMOVE taşıma modeli kullanılmıştır (Siskos, Zazias, Petropoulos, Evangelopoulou ve Capros, 2018).

Çalışma, gelecekteki enerji talebini ve sera gazı emisyonlarını tahmin etmek ve Nijerya'nın Lagos şehrinde en etkili ASI ("Kaçın", "Değiştir", "Geliştir") seçeneğini belirlemek için

LEAP modeli kullanılmıştır. Sonuçlar, Lagos'un emisyon azaltma hedefine ulaşmasının önündeki en büyük engelin yollarda çok eski araçların bulunması olduğunu göstermektedir (Maduekwe, Akpan ve Isihak, 2020).

Çalışmada kullanılan TIMES modeli, en düşük maliyetli güç sistemini üretmek için doğrusal programlamayı kullanan, teknoloji açısından zengin, aşağıdan yukarıya bir model oluşturmaktadır. Çalışmada, ulaştırma sektörünün İstanbul'daki iklim değişikliği üzerindeki etkilerini değerlendirmek için 2016'dan 2050'ye kadar olan sera gazı emisyonları modellenmiştir. CO₂ emisyon limitinin uygulandığı senaryoda maksimum emisyon azaltımı gerçekleştirilmiş ve 2050 yılında 2016 yılına göre %39 oranında azalma sağlanmıştır (Güzel ve Alp, 2020).

Çalışmada kullanılan CTI modeli, mevcut en iyi teknolojileri, davranış değişikliklerini ve yakıt karışımı gibi bir dizi azaltma seçeneğini uygulayarak emisyonların zaman içindeki gelişimini analiz etmektedir. Model aşağıdan yukarıya enerji modelleme özelliğine sahiptir. Senaryo sonuçlarına göre, 2050 yılında ulaşım tercihlerinin en çevreci araç modlarına kayması ile ulaştırma sektörü emisyonları 500 Mt CO₂'nin altına, elektrifikasyon ile 300 Mt CO₂'nin altına, alternatif temiz yakıtların kullanımı ile ise "0"a düşmektedir (CAT, 2020).

Çalışmada kullanılan BUEMS modeli, enerji üretimi, iletimi ve tedariki gibi karmaşık ilişkileri kapsayan, geniş ölçekli, aşağıdan yukarıya enerji modelleme özelliklerine sahiptir. Çalışma, enerji tüketimi ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiye odaklanmaktadır. Çalışmanın spesifik sonucu, dizel yakıtlı araçların yasaklanmasının ömür boyu maliyetleri ve emisyonları azalttığı yönündedir (Kumbaroğlu, 2020).

4. METODOLOJİ

Bu tezde geliştirilen TUSEM, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından kullanılan ve ETKB'deki (IPA projesi kapsamında oluşturulan proje ekibi) projeden sorumlu yabancı uzmanlar ve enerji ve tabii kaynaklar uzmanları tarafından geliştirilen TESM'e dayanmaktadır (EU, 2019). TESM, enerji modellemesinde AB'de birçok ülke tarafından kullanılan Fiyat Tabanlı Piyasa Denge Sistemi (PRIMES) enerji modeli altyapısını kullanmaktadır (Capros ve diğerleri, 2018; Brugger, Eichhammer, Mikova ve Dönitz, 2021). TESM, Genel Cebirsel Modelleme Sisteminde (GAMS) geliştirilmiştir ve arayüz olarak Microsoft Excel'i kullanmaktadır. Model, ayrıntılı enerji sistemi projeksiyonları, enerji talebi tahmini ve enerji sektörü planlaması ve ulusal iklim ve enerji politikası kararlarının etki değerlendirmesi için tek ülke modeli olarak tasarlanmış tam teşekküllü bir enerji talep ve arz modelidir (EU, 2019).

PRIMES modeli, AB enerji sisteminin tepkisini farklı ekonomik gelişmelere, dış kısıtlamalara ve enerji tüketicilerini ve enerji tedarik sistemlerini etkileyen faktörlere göre simüle etmektedir (Kannavou, Zampara ve Capros, 2019). Modelin karar verme davranışı ileriye dönüktür ve mikroekonomik teoriye dayalıdır. PRIMES, enerji talebini, arzını ve emisyon azaltma teknolojilerini açıkça temsil etmekte ve bir dizi teknolojiyi içermektedir (Süsser ve diğerleri, 2021). Model, çeşitli sektörlerin enerji tüketimini, dönüşümünü ve tedarikini, ilgili maliyetleri ve piyasa fiyatlarını tanımlamaktadır (Siskos ve diğerleri, 2018; Yoro ve diğerleri, 2021). Aşağıdan yukarıya mühendislik modelleme yönleriyle birlikte yukarıdan aşağıya davranışsal modellemenin dinamiklerini yakalamaya çalışan PRIMES, doğrusal olmayan karma tamamlayıcılık yaklaşımına dayanmaktadır (E3Modelling, 2018).

4.1. Modelin Genel Tanıtımı ve Seviyelendirilmesi

TUSEM, TESM'yi temel alarak, enerji tüketicilerinin ulaştırma sektörü için yolcu ve yük talebi ihtiyaçları ile geçmiş alışkanlıkları ekonomik, sosyal ve politik kısıtlamalarla değerlendirerek simüle eder. Bunun için yolcu ve yük talepleri, üç Alt Sektör Faaliyeti, iki Tedarik Süreci Faaliyeti ve bir Teknoloji Düzeyinde Faaliyet olmak üzere toplam altı seçim seviyesine ayrılmıştır (Çizelge 4.1). SB düzeyinin aktivite enerjisinden başlayarak, her bir alt sektöre özgü hiyerarşik bir yuvalama ağacı boyunca ayrışma gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1. TUSEM ağaç diyagramı

	Alt Sektör Faaliyeti			Arz Süreci		Teknoloji
	SB	SC	SD	SE	SF	SFW
Yolcu	Kara/Deniz Yolcu Taşımacılığı	Denizyolu Yolcu Taşımacılığı	Denizyolu Yolcu Taşımacılığı	ICE Deniz Taşıtları – Petrol	Yakıt-Fuel Oil	Sıradan Geliştirilmiş Orta Orta Gelişmiş-İleri Orta İleri-Gelecek Orta Gelecek
				ICE Deniz Taşıtları – Gas	Yakıt-Gaz	
				Elektrik Motorlu Deniz Taşıtları	Yakıt-Elektrik	
		Özel Yolcu Taşımacılığı (PSPRV)	Özel Araçlar	Elektrik Motorlu Özel Araçlar	Yakıt Elektrik	
				H2 Yakıt Hücreli Özel Araçlar	Yakıt Hidrojen	
				ICE Özel Araçlar	Yakıt Dizel	
					Yakıt Benzin	
					Yakıt Gaz	
				Plug-In Hibrit Özel Araçlar	Yakıt Dizel	
					Yakıt-Benzin	
			2-Tekerlekli	ICE 2-Tekerlekli	Yakıt-Benzin	
				Elektrik Motorlu 2-Tekerlekli	Yakıt-Elektrik	
		Kamu Yolcu Taşımacılığı (PSPRD)	Metro/Tramvay	Metro/Tramvay	Yakıt-Elektrik	
			Otobüs/Minibüs	Elektrik Motorlu Otobüs/Minibüs	Yakıt-Elektrik	
				H2 Yakıt Hücreli Otobüs/Minibüs	Yakıt-Hidrojen	
				ICE Otobüs/Minibüs	Yakıt-Dizel	
		Demiryolu Yolcu Taşımacılığı	Yavaş Trenler	Yavaş Trenler	Yakıt-Dizel	
					Yakıt-Elektrik	
			Hızlı Trenler	Hızlı Trenler	Yakıt-Hidrojen	
					Yakıt-Elektrik	
	Hava Taşımacılığı	Havayolu	Havayolu	Jet Motoru	Yakıt-Kerosen	
				Elektrik Motorlu	Yakıt-Hibrit Elektrik	
					Yakıt-Elektrik	
Yük	Yük Taşımacılığı	Demiryolu Yük Taşımacılığı	Demiryolu Yük Taşımacılığı	ICE Demiryolu Araçları	Yakıt-Dizel	İleri-Gelecek Orta Gelecek
				Elektrik Motorlu Demiryolu Araçları	Yakıt-Elektrik	
				ICE Demiryolu Araçları-Petrol	Yakıt-Petrol	
		Denizyolu Yük Taşımacılığı	Denizyolu Yük Taşımacılığı	ICE Denizyolu Araçları-Gaz	Yakıt-Gaz	
				Elektrik Motorlu Denizyolu Araçları	Yakıt-Elektrik	
				ICE Denizyolu Araçları-Petrol	Yakıt-Hidrojen	
		Karayolu Yük Taşımacılığı	Ağır Yük Araçları (HDV)	Elektrik Motorlu Tır/Kamyon	Yakıt-Elektrik	
				H2 Yakıt Hücreli Tır/Kamyon	Yakıt-Hidrojen	
				ICE Tır/Kamyon	Yakıt-Dizel	
					Yakıt-Gaz	
			Hafif Yük Araçları (LDV)	Elektrik Motorlu Kamyonet	Yakıt-Elektrik	
				H2 Yakıt Hücreli Kamyonet	Yakıt-Hidrojen	
				ICE Kamyonet	Yakıt-Dizel	
					Yakıt-Benzin	
					Yakıt-Gaz	
				Plug-In Hibrit Kamyonet	Yakıt-Plug-In Hibrit Dizel	
					Yakıt-Plug-In Hibrit Benzin	

SF seviyesindeki ekipmanlara 7 teknoloji seviyesi arasından karar verilmekte olup SFW ağacı, modele dahil edilen teknoloji kategorileri kümesidir ve teknoloji türlerini içermektedir.

4.2. Modelin Matematiksel Yapısı

TUSEM'in başlangıç noktası ekonomik faaliyete olan taleptir. Model, iç içe geçmiş bir karar ağacı üzerinde ayırık düğümlerde seçimler yapmaktadır. Model kusurlu ikame temelinde

geliştirilmiştir ve matematiksel formülasyonu, bireysel tercihlerin heterojenliğini temsil eden logit işlevlerinin kullanımıyla kesikli seçim teorisine dayanmaktadır. İç içe geçmiş logit işlevleri, her düzeyde faaliyet seçimlerini ayırmak için kullanılmaktadır.

4.2.1. Kesikli seçim teorisi

Kesikli seçim modelleri veya nitel seçim modelleri, logit işlevlerinin kullanımı yoluyla, ulaşım modları arasında seçim yapmak, farklı süreçler veya yakıtlar arasından seçim yapmak gibi iki veya daha fazla farklı alternatif arasındaki seçimleri tahmin etmektedir (Anas, 1983). Kesikli seçim modelleri, iki veya daha fazla alternatif arasındaki seçim sürecini tanımlamaktadır. Sürekli modellerin aksine, seçimlerin ayrık olması gerekir. Sonuç olarak, tüketici alternatiflerden sadece birini seçmektedir.

Başlangıç noktası: Bir bireyin seçimi

- Seçeneklerin sayısı: N
- Seçenekler: $A_1, A_2, A_3, \dots, A_N$

Her bir seçenek bireye spesifik bir miktarda fayda U sağlar.

$$\begin{aligned}
 \text{Seçenek } A_1 : U_1 &= V_1 + \varepsilon_1 \\
 \text{Seçenek } A_2 : U_2 &= V_2 + \varepsilon_2 \\
 \dots \\
 \text{Seçenek } A_N : U_N &= V_N + \varepsilon_N
 \end{aligned}$$

(4.1)

$P(A_1)$ ve $P(A_2)$ olasılıkları, ε_1 ve ε_2 değişkenlerinin dağılımı için spesifik varsayımlar altında hesaplanabilmektedir. Kesikli seçim teorisinde ε_1 ve ε_2 , eşit varyans ve sıfır ortalamalı aynı dağılımı sahiptir. ε_1 ve ε_2 arasındaki dağılımlar birbirinden bağımsızdır.

Çizelge 4.2. TUSEM Model Fonksiyonu

Dağılım	CDF: $F(x)=e^{-e^{(-x)}}$, PDF: $f(x)=e^{-x} \cdot e^{-e^{(-x)}}$
Model Türü	Logit

Çizelge 4.2'deki dağılıma göre çoklu seçim durumunda $\{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ diğer seçenekler yerine A_1 seçme olasılığı:

$$P_{A1} = \frac{e^{V_1}}{\sum_{j=1}^N e^{V_j}} \quad (4.2)$$

olmaktadır.

TUSEM'de logit fonksiyonu karar vermenin ana mekanizmasıdır. Bu durumda, maliyet-fayda fonksiyonuna dâhil edilen gözlemlenen parametre, seçimin uzun vadeli veya kısa vadeli maliyetidir.

$$U_j = -\gamma \cdot p_j + \varepsilon_j \quad (4.3)$$

U_j : seçenek j'den elde edilen fayda

γ : faydanın fiyat değişikliklerine duyarlılığı

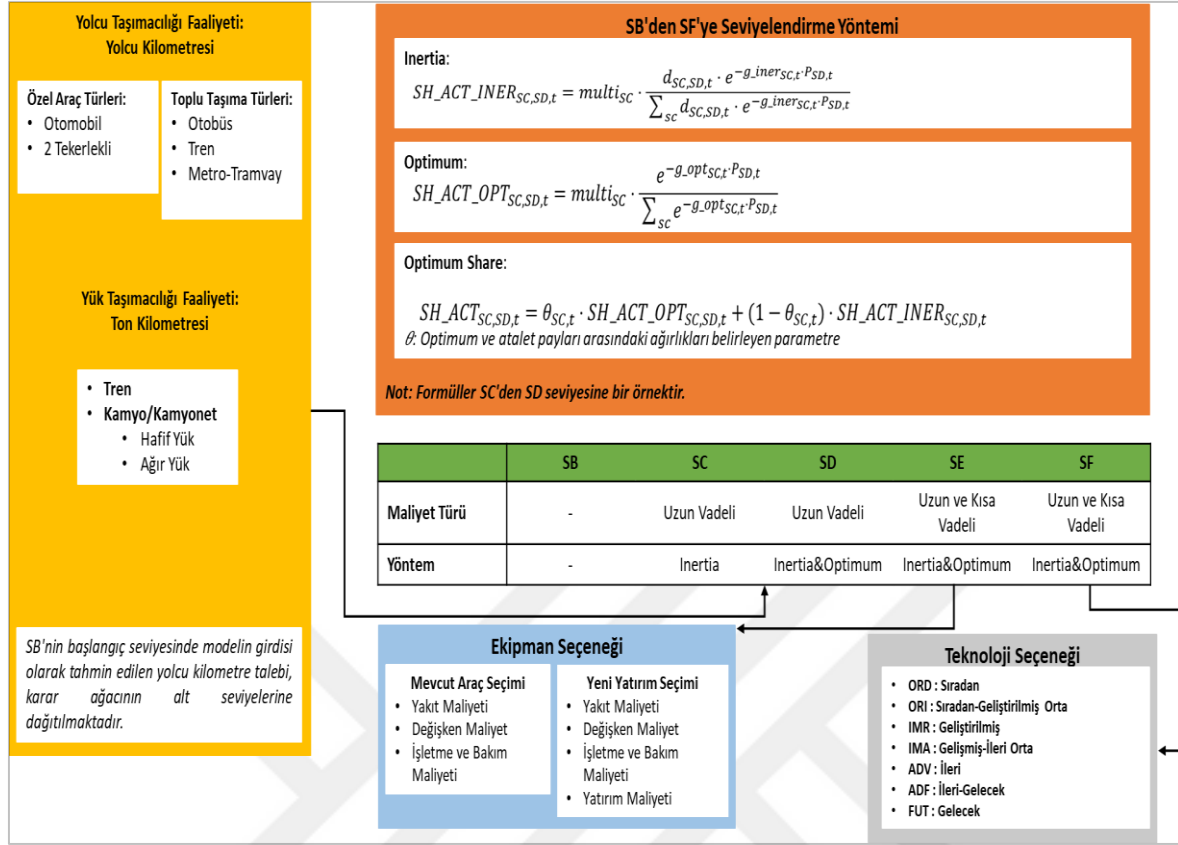
p_j : seçenek j'nin birim maliyeti

N tane kesikli seçenek arasında seçimin olasılığı veya payı şöyle hesaplanabilir:

$$SH_j = \frac{e^{-\gamma p_j}}{\sum_{j=1}^N e^{-\gamma p_j}} \quad (4.4)$$

Model fonksiyonuyla seçimler eksik ikame prensibi altında yapılmaktadır. En ucuz seçenek, en pahalı seçeneklerden tamamen üstün olmamaktadır. Bu durum en ucuz kaynak tükenene kadar kullanılır mantığına uygun olan doğrusal programlama problemiyle tam olarak uyumlu olmamaktadır. Bu yüzden modelde doğrusal programlama veya doğrusal olmayan programlama yöntemleri kullanılmamakta ancak model bir dizi doğrusal ve doğrusal olmayan denklem ile tanımlanmaktadır. Bu denklemlerde belli eşitlikler ve eşitsizlikler yer almakta ve belli bir amaç fonksiyonu bulunmamaktadır.

Yukarıdan aşağıya davranışsal modellemenin dinamiklerini aşağıdan yukarıya mühendislik modelleme yönleriyle birlikte yakalamaya çalışan TUSEM, bu yüzden doğrusal olmayan karma tamamlayıcılık algoritmalarıyla optimum çözüme ulaşmaktadır (Dirkse ve Ferris, 1995; E3Modelling, 2018). TUSEM'in hesaplama sırası Şekil 4.1'de yer almaktadır.



Şekil 4.1. TUSEM'deki aktivitelerin dağıtım adımları ve fonksiyonları

4.2.2. Karışık tamamlama problemi (MCP)

Karışık tamamlama problemleri (MCP), denklemlerin ve eşitsizliklerin bir karışımını içeren doğrusal olmayan denklemlerin kare sistemlerinin uzantıları olarak görülebilmektedir (Ferris ve Pang, 1997). Pek çok ekonomik sorun, tamamlayıcılık sorunları olarak ifade edilebilmektedir. Bir MCP aşağıdaki gibi tanımlanır (Rutherford, 1995).

$F: \mathbb{R}_n \rightarrow \mathbb{R}_n$ ve alt ve üst sınırları l, u olan sürekli ve türevlenebilir bir fonksiyon olarak değerlendirilirse MCP, aşağıdaki koşullardan birinin her bir $i \in \{1, \dots, n\}$ için geçerli olduğu $x \in \mathbb{R}_n$ 'i bulmaktır:

$$F_i(x) < 0 \quad \text{and} \quad x_i = l_i$$

$$F_i(x) = 0 \quad \text{and} \quad l_i < x_i < u_i$$

$$F_i(x) > 0 \quad \text{and} \quad x_i = u_i$$

(4.5)

MCP, $F_i(x)$ fonksiyonunu, bir alt ve bir üst sınırı olan x_i değişkeniyle ilişkilendirir. x_i , sınırlar arasındaysa, $F_i(x)$ sıfıra eşittir. $F_i(x)$, x_i alt sınırdaysa ise negatif, x_i üst sınırdaysa ise pozitifdir. Birçok problem MCP formatında yazılabilir. Üst sınır $+\infty$ 'a eşitlenmişse ve alt sınır sıfıra eşitse, MCP formu şuna indirgenir:

$$\begin{aligned} -F_i(x) &> 0 \quad \text{and} \quad x_i = 0 \\ F_i(x) &= 0 \quad \text{and} \quad x_i > 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Ayrıca eğer alt sınır $-\infty$ 'e eşitse, kare doğrusal olmayan denklemler problemini çözmeye eşdeğerdir.

Bu doğrultuda eksik ikame yönteminin uygulandığı ağaç diyagramında düzey SB, modelin başlangıç noktası olarak belirlenmekte ve dışsal olarak tanımlanan pkm ve tkm için projeksiyonları içermektedir. Bu seviye, ekonominin diğer sektörleri ile ikame edilemeyen bölümü kapsamaktadır. Model seviyelerinin dağılımını yaparken 2 tip hesaplama kullanılmakta olup bu hesaplamalar kapsamında Türkiye ortalamaları göz önüne alınarak SB-SD seviyeleri arasında düşük ikame düzeyi, SE seviyesinden itibaren ise yüksek ikame düzeyi uygulanmaktadır. SB-SC seviyeleri, ölçeklendirme nedenleriyle modele dahil edilmiştir. Bu durum modelin bu seviyelerde herhangi bir karar almayacağı ve aktivite verilerinin doğrudan SD seviyesine eklenebileceği anlamına gelmektedir. Düşük ikame düzeyi bu anlamda belirtilmektedir. Bu nedenle bu seviyelerde sadece geçmişe bağlılık(inertia) payları dikkate alınmaktadır.

Çizelge 4.3. TUSEM'deki aktivitelerin seviyelendirilmesi ve maliyet türleri

Seviye	Tanım	Formül	Maliyet Türü	Eğilim
SA	Karar Ağacı Üst Seviye			
SB	Dışsal olarak tanımlanan SB düzeyindeki alt sektörlerin faydalı enerjisi			
SC	SB düzeyindeki alt sektörlerin, SC düzeyinin alt sektörlerine aktivite açısından enerjisinin tahsisi	Logit	UVM	Inertia
SD	SC düzeyindeki alt sektörlerin SD düzeyindeki alt sektörlerle aktivite açısından faydalı enerjisinin tahsisi	Logit	UVM	Inertia ve Optimum
SE	SD seviyesindeki alt sektörlerin faaliyet açısından aktivite enerjisinin SE seviyesindeki ekipmana tahsisi	Logit	UVM + KVM	Inertia ve Optimum
SF	SF seviyesindeki ekipmana SE seviyesindeki ekipmanların aktivite açısından yararlı enerjisinin tahsisi	Logit	UVM + KVM	Inertia ve Optimum
SFW	SF'de ekipman tipi karışımının ve yakıt karışımının hesaplanması	Logit	UVM + KVM	Inertia ve Optimum

UVM: Uzun Vadeli Maliyet, KVM: Kısa Vadeli Maliyet

TUSEM’de alt sektörler ve ekipmanları Çizelge 4.1’de ayrıştırıldıktan sonra, daha düşük bir seviyedeki her ekipman veya alt sektörün, karşılık gelen faaliyet talebinin karşılanmasına katkıda bulunduğu yüzdeler hesaplanmaktadır. Aktivitenin ve dolayısıyla nihai enerjinin tahsisi için yüzdeler (paylar), alt sektörler ve süreçler arasında tamamlayıcılık ve ikame edilebilirlik dikkate alınarak hem temel yıl tercihlerine (inertia) hem de maliyet minimizasyon kriterlerine (optimum) dayalı olarak hesaplanmaktadır.

TUSEM’de bir üst seviyenin aktivitesinin alt sektörler veya alt seviyenin süreçleri arasında tahsisi, logit fonksiyonlarının kullanılmasıyla yapılmaktadır. Alt sektörlerin veya süreçlerin paylarını hesaplamak için işleve eklenen belirleyici değişken maliyettir. Fonksiyon alt sektörlerin/süreçlerin mevcut seçimlerinin maliyetlerini veya seçimlerin maliyetlerine karşı spesifik duyarlılığını varsayan süreçleri karşılaştırılmakta ve her alt sektörün veya sürecin üst düzeydeki aktivite bileşimindeki payı tanımlanmaktadır. Bu anlamda hesaplanan paylar hem temel yıl verilerinden (inertia) türetilen geçmiş ağırlıklı tercihleri hem de daha ekonomik olarak rasyonel bir tutuma (optimum seçimler) dayanan optimum seçenekleri dikkate almaktadır.

Söz konusu payların hesaplanması karar ağacının alt seviyesinden başlamaktadır. Çünkü alt seviyenin ağırlıklı maliyetleri üst seviyenin paylarını belirlemektedir.

- SF Seviyesi: Yakıt karışımı seçimi, yakıtla ilgili kısa vadeli maliyetler tarafından belirlenmekte ve hem inertia hem de optimum eğilimleri hesaba katmaktadır.
- SE Seviyesi: SF seviyesinde hesaplanan ağırlıklı maliyetlere (hem kısa hem de uzun vadeli) dayanarak, SE seviyesindeki tedarik süreçlerinin karşılık gelen aktivite payları tahmin edilmektedir. Bu seviyede ağırlıklı olarak SF seviyesindeki seçeneklerin aktivite paylarına atıfta bulunmaktadır. Bu nedenle, kısa vadeli ve uzun vadeli maliyetler, alt düzeydeki farklı seçeneklerin aktivite paylarına göre ağırlıklandırılmaktadır.
- Seviye SD: SE seviyesinde hesaplanan genelleştirilmiş birim maliyetlere (sadece uzun vadeli) dayalı olarak, SD seviyesindeki alt sektörlerin karşılık gelen aktivite payları tahmin edilmektedir.
- Seviye SC: Seviye SD’de hesaplanan genelleştirilmiş birim maliyetlere (sadece uzun vadeli) dayanarak, SC seviyesindeki alt sektörlerin karşılık gelen aktivite payları hesaplanmaktadır.

Hem SB düzeyindeki etkinlik projeksiyonlarını hem de her ağaç düzeyindeki farklı seçeneklerin yüzdeleri belirlendikten sonra, etkinlik SB-SD düzeyleri arasında dağıtılır. Yuvalama ağacının son seviyesi SF , en detaylı ekipman seviyesi olup üretilen faydalı enerjinin nihai enerji tüketimine dönüştürüldüğü seviyedir. Spesifik enerji tüketimi, kullanım oranları, yatırım ve sabit maliyetler vb. dahil olmak üzere ekipmanın tüm teknik özellikleri, seviye SF ekipmanı için tanımlanmaktadır. SF seviyesindeki hesaplanan nihai enerji tüketimine dayalı olarak, toplam nihai enerji talebi SB seviyesinin karşılanması için tahmin edilmektedir. SB seviyesinin hesaplanan aktivitesine karşılık gelen enerji talebi, SE ve SF son seviyelerinin tedarik süreçleri tarafından faydalı enerji üretimi ile karşılanmaktadır. Model, aktiviteleri tahsis ederek ve her seviyedeki kararları ilgili maliyetlere veya geçmiş alışkanlıklara göre alarak, her seviyede karar vermenin açıklaması için aşağıdan yukarıya bir yaklaşım kullanılmaktadır.

- SB düzeyinin aktivite talebi, açıklandığı gibi girdi olarak dışsal olarak belirlenir.
- Aktivite talebi, SB'den SD'ye karar ağacının seviyelerine dışsal olarak tahsis edilmektedir. Bu tahsis genellikle belirli politikalara göre yapılmaktadır. Örneğin karayolu yolcu taşımacılığında pkm'de toplu taşıma oranının belirli yıllarda %30'a çıkarılması/azaltılması.
- SE'den SF'ye olan aktivite talebi, Şekil 4.1'de açıklandığı gibi hem temel yıl tercihlerine (inertia) hem de maliyet minimizasyonu kriterlerine (optimum) göre logit fonksiyonları kullanılarak tanımlanmaktadır. Buna göre, fonksiyona eklenen belirleyici değişken maliyettir.
- SF düzeyinde, model gerekli yatırımları hem inertia hem de optimum kriterlere göre uzun vadeli maliyetler ve kısa vadeli maliyetler olarak, yine logit fonksiyonlarını kullanarak hesaplamaktadır. Ayrıca bu seviyede, ekipman tipi karışımı ve aktivite talebini karşılayacak ilgili yakıt karışımı da belirlenmektedir.

5. MODELİN VERİ ANALİZİ, VARSAYIMLARI, KALİBRASYONU

5.1. Modelde Kullanılan Veriler ve Değişkenler

Türkiye'de kara, hava ve deniz yollarında faaliyet gösteren yolcu ve yük araçlarının 2018 yılı istatistiki verileri üzerinden tasarlanan TUSEM'in 2025-2070 yılları için enerji modellemesi yapılmıştır. Modelleme çalışmasında kullanılan veriler Türkiye resmi kurumlarından ve IEA, Eurostat ve Avrupa Birliği gibi uluslararası veri tabanları ve raporlardan elde edilmiştir. Ayrıca modelde kullanılan bazı değişkenlerin ve kısıtlamaların tanımları Çizelge 5.1 'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. TUSEM’de kullanılan değişkenler ve kısıtlar-1

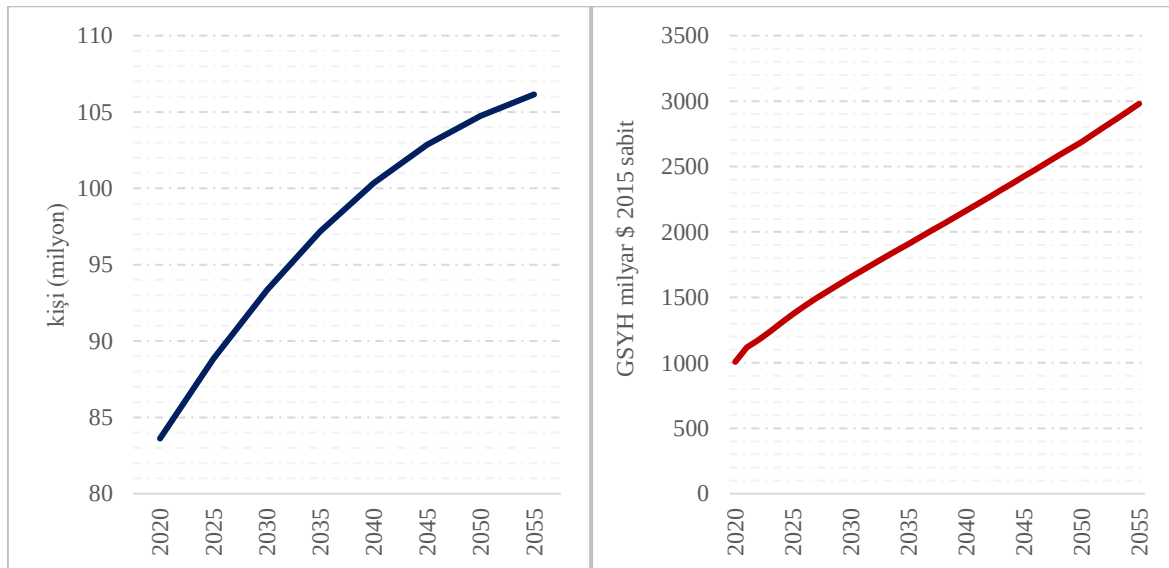
Kullanım Amacı	Değişkenler	Tanım
Yolcu-km ve ton-km değerlerinin tahmini için kullanılan ve modelde dışsal olarak kullanılan değişkenlerdir	Nüfus	Ülkede yaşayan kayıtlı vatandaşların toplam sayısını gösterir.
	GSYİH	Belirli bir zamanda ülke sınırları içinde üretilen tüm nihai mal ve hizmetlerin parasal değerini ifade eder.
	Coğrafi Alan	Türkiye'nin yüz ölçümü (km ²)
2018 yılı bazında Türkiye Enerji Denge Tablosundaki enerji tüketimlerini sağlayacak şekilde araç modları bazında özel enerji tüketimlerini oluşturmaya ve modeli kalibre etmeye yarayan değişkenler	Araç Stokları	Türkiye’de kara, deniz ve hava yolcu ve yük taşımacılığında kullanılan araç tiplerinin sayısını ifade eder.
	Araç-km	Bir motorlu kara taşıtının bir kilometre mesafedeki hareketi ile elde edilen trafik ölçüm birimini ifade eder.
	Kullanım ömrü	Bir araç hurdaya çıkarılmadan önce trafikte geçirilen ortalama süreyi (yıl) ifade eder.
	Doluluk Oranı	Bir araçtaki ortalama yolcu/yük sayısını ifade eder.
Nüfus, GSYH ve Coğrafi Alan kullanılarak 2070 yılına kadar oluşturulan ve modele SB düzeyinde girdi sağlayan değişkenler	Yolcu-km (pkm)	Bir yolcunun bir kilometre mesafeden taşınmasıyla elde edilen trafik ölçüm birimini ifade eder.
	Ton-km (tkm)	Bir ton yükün bir kilometre mesafeye taşınmasıyla elde edilen trafik ölçüm birimini ifade eder.
Modelde maliyet ve enerji kısıtları olarak yer alan, teknoloji, verimlilik ve yaparak öğrenme endeksi değişimleri ile projeksiyon yıllarında değişebilen değişkenler	Özel Enerji Tüketimi	Bir aracın km başına enerji tüketimini ifade eder (kWh/arac-km). Kalibrasyon, 2018 Türkiye Enerji Dengesi Tablosundaki değerlere göre gerçekleştirilir.
	Yatırım Maliyeti	Bir araç satın almak için tahakkuk ettirilmesi gereken tek seferlik maliyeti ifade eder.
	İşletme ve Bakım Maliyeti	Hizmetten çıkarma sırasındaki hurda fiyatının, bir aracın kullanım ömrü boyunca işletme maliyeti ve onarım bakım maliyetinin toplamından düşülmesiyle elde edilen maliyeti ifade eder.
Ulusal Sera Gazı Envanteri Raporundan alınan ve her bir yakıtın emisyon salınımlarının hesaplanması için kullanılan değişken	Emisyon Faktörü	Bu, faaliyet verilerinin sera gazına dönüştürülmesini sağlayan katsayıyı ifade eder. Başka bir deyişle, belirli bir kaynağın faaliyet birimleri ve süreçleri tarafından ortalama emisyon oranıdır.
Karbon ve Verimlilik kısıtlarının ifaden eden değişkenler	CO ₂ ve Verimlilik Standartları	Ekipman/teknoloji bileşenlerini tanımlamak için karbon ve verimlilik hedefleri (EURO standartları paradigması). Bir aracın km başına tükettiği enerjiyi (kwh/km) ve CO ₂ 'yi (gr CO ₂ /km) ifade eder.
	Karbon Fiyatı	Ulaşım modları için emisyon maliyetlerini ifade eder.

Çizelge 5.2. TUSEM’de kullanılan değişkenler ve kısıtlar-2

Hükümetler tarafından belli bir teknolojiye, teknoloji seviyesi bazında yatırımları maliyetlerini azaltmak için kullanılan değişken	Yatırım Sübvansiyonları	Yeni verimli teknolojilerin sermaye maliyetlerini düşüren katsayıyı ifade eder.
Yakıt ve teknoloji bazında kısıtlar oluşturmayı sağlayan değişkenler	Yakıt Yasağı	Belirli son kullanımlarda yakıt tüketimi kısıtlanmasını ifade eder.
	Teknoloji Yasağı	Teknoloji seviyelerinin belli bir yıldan sonra kısmen veya tamamen kullanımlarının yasaklanmasını ifade eder. Örneğin içten yanmalı motor teknolojilerinin 2035 yılından sonra piyasaya girişlerinin yasaklanması
Yatırımların projeksiyon boyunca geri ödemeleri için belirlenen faiz oranı değişkeni	İndirim Oranları	Yatırımların yıllık ödeme oranlarını ifade eder.
Belirlenen politikalar sonucunda oluşacak davranışsal etki değişkeni ile paralel olarak bir teknolojinin hızlıca benimsenmesi sonucunda maliyetleri azaltmaya yarayan değişken	Yaparak Öğrenme Endeksi	Üretim sürecindeki belirsizliklerin ortadan kaldırılması nedeniyle yeni teknolojilerin sermaye maliyetlerinin azaltılmasını temsil eder.
	Davranış Değişikliği	Doluluk oranının artırılması ve araç paylaşımı ve toplu taşımaya geçilmesi.

5.2. Veri Analizi ve Aktivite Projeksiyonları

Ulaştırma ile ilgili yapılacak tüm değerlendirmelerin bilimsel bir temele oturtulabilmesi için ulaşım talep fonksiyonunun gözden geçirilmesi gerekmektedir. Bu anlamda literatür gözden geçirildiğinde; farklı değişkenlerden söz edilebilirse de ulaşım talep fonksiyonunda oluşan hareketin %90’ının nüfus ve gelir seviyesindeki değişimlerle açıklanabildiği görülmektedir. Bu anlamda geleceğin ulaşım talebini tanımlayabilmek için öncelikle küresel ölçekte nüfus ve gelir projeksiyonlarına bakmak gerekmektedir (Butyrkin, Kulikova, Madyar, ve Dmitrieva, 2020)

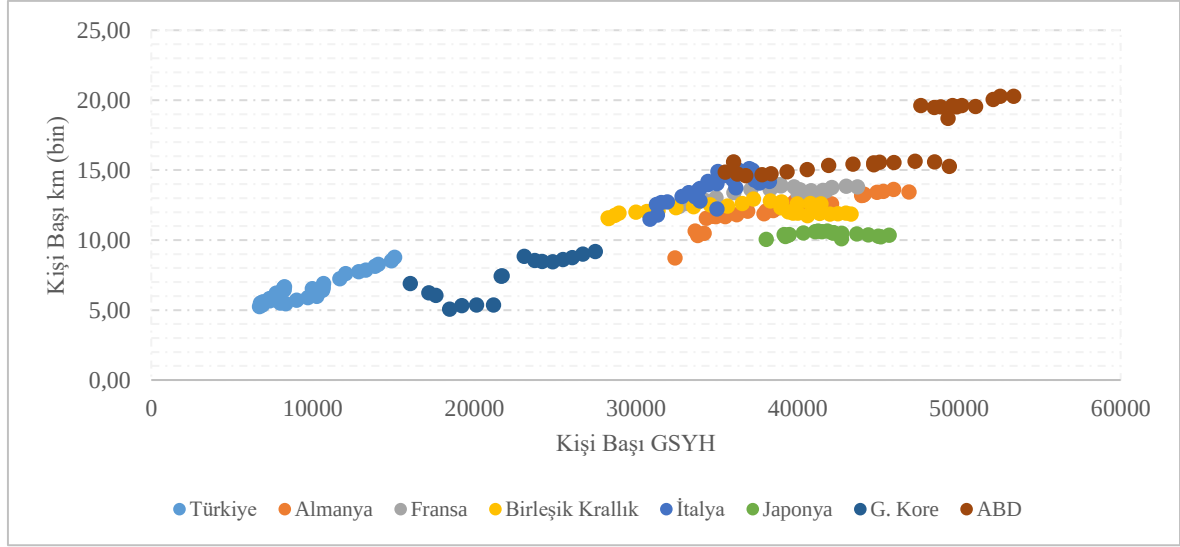


Şekil 5.1. 2025-2055 yılları nüfus ve GSYH tahminleri

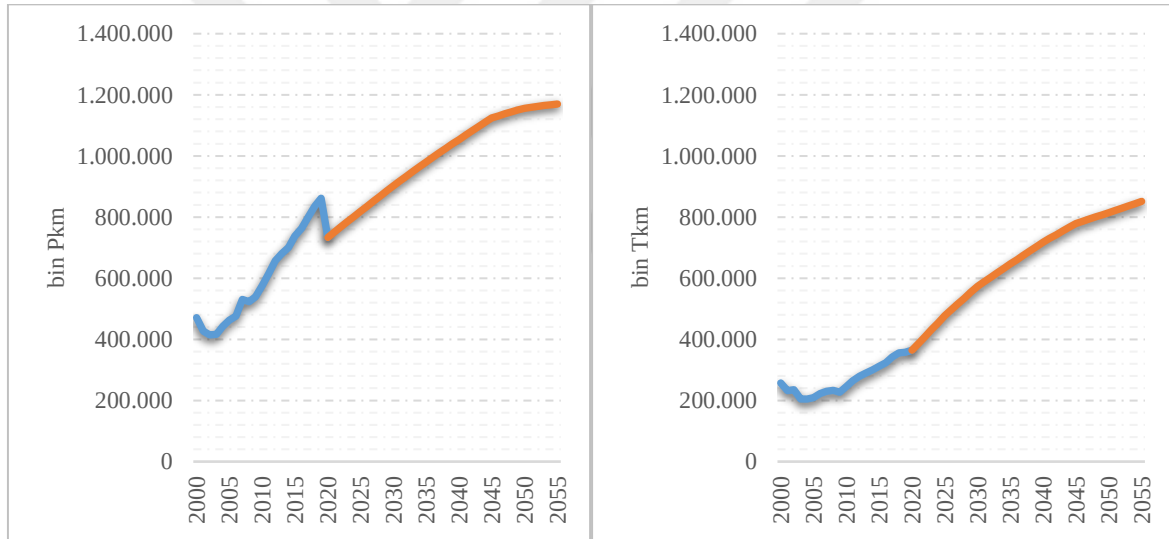
Türkiye nüfus projeksiyonu, TÜİK'in “2018-2080 Nüfus Projeksiyonu Çalışmasına” dayanmaktadır. Nüfusun yıllık bileşik artış hızı %0,5 olarak kabul edilmiş olup 2020-2055 yılları arasındaki nüfus tahmini Şekil 5.1'de gösterilmektedir (TÜİK, 2018). Türkiye'nin Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYH) projeksiyonu, Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı'nın (OECD) 2020-2060 çalışmasına dayanmaktadır. Buna göre GSYH'nin yıllık bileşik büyüme oranı %3,1 olarak kabul edilmiş olup, 2020-2055 yılları arasındaki GSYH tahmini Şekil 5.1'de gösterilmektedir (OECD, 2021).

Türkiye tarafından açıklanan resmi pkm verileri sadece şehirlerarası seyahatleri kapsamaktadır. Hafif ticari araçlar da tkm verilerinin kapsamı dışındadır. Buna göre araç sayısı, bir aracın yıllık ortalama kilometresi (TÜİK, 2020); birkaç AB ülkesinde binek otomobillerin doluluk oranları (Eurostat, 2022b); karayolu yük taşımacılığı modlarının kapasite faktörleri (KGM, 2020); uçak sayısı ve kapasite faktörleri (DHMİ, 2020; SHGM, 2022), gemi sayısı ve kapasite faktörleri (DGM, 2020; TCS, 2020) analiz edilmiştir. Örneğin sadece şehirlerarası hareketliliği kapsayan 2018 yılı pkm değeri 329,36 milyardır. Ancak resmi olarak açıklanan araç sayısı ve araç km değeri dikkate alınarak pkm verilerine göre tüm taşıma modlarının doluluk oranları ve tkm verilerine göre tüm yük taşımacılığı modları için kapasite faktörleri analiz edilerek derlenmiştir. Buna göre 2018 yılı için yeni pkm değeri 801,3 milyar olarak hesaplanmış olup 2000-2017 yılları için de aynı hesaplamalar uygulanmıştır.

Pkm ve tkm verilerinin projeksiyon yılı tahminleri 2000-2018 yılları baz alınarak yapılmış olup bazı gelişmiş ülkelerin zaman içinde kişi başına düşen km ile kişi başına düşen GSYH arasında doğrusal bir ilişki gösterdiği değerlendirilmiştir. Kişi başına düşen GSYH belli bir seviyeden sonra artsa bile, kişi başına düşen km değerinin sabit olduğu gözlenmiştir (Şekil 3) (OECD, 2022; World Bank, 2022a; World Bank, 2022b). Literatür araştırması ve regresyon analizi sonucunda, pkm ve tkm verilerinin belirli bir ekonomik büyüme düzeyinden sonra doygunluk noktasına yaklaşacağını varsayan lojistik eğri fonksiyonunun en iyi tahmin yöntemi olduğuna karar verilmiştir. Bu eğri, kişi başına pkm-tkm, kişi başına düşen GSYH ve ülke alanı (km^2) gibi değişkenler kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 5.3) (Butyrkin, Kulikova, Madyar ve Dmitrieva, 2020). İlgili doygunluk noktası, nüfus projeksiyonundaki artış hızının yavaşladığı ve durgunlaştığı yıllara denk gelmekte olup bu nokta da Şekil 5.2'te gelişmiş ülkelerin kişi başına düşen km değerleri ve dolayısıyla pkm ve tkm değerleri ile paralellik göstermektedir.



Şekil 5.2. Kişi başı GSYH ve kilometre ilişkisi



Şekil 5.3. 2025-2055 yılları pkm ve tkm gelişim öngörüsü

5.3. Kalibrasyon

Modelin ana girdisi olan aktivite, ulaşım kategorisine bağlı olarak pkm ve tkm olarak belirlenmektedir. 2018 baz yılı doluluk oranı (binek araçlar için) ile aktivite, stok ve kilometreye göre hesaplanan kapasite faktörü (yük araçları için) için Türkiye ve AB ortalamaları arasında tutarlılık sağlanmaya çalışılmıştır (Eurostat, 2022b). Son olarak 2018 yılı enerji dengesi tablosunda (ETKB, 2022) karayolu, demiryolu, havayolu ve denizyolu modlarındaki enerji tüketimini sağlayacak SEC oranları (kwh/km) model seviyelerine (SD-SE) göre hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar için şu formüller kullanılmıştır.

$$\text{Aktivite} = \text{Araç Sayısı} \times \text{Yıllık Ortalama km} \times \text{Doluluk Oranı (Yük Kapasite Faktörü)} \quad (5.1)$$

$$\text{Özel Enerji Tüketimi} = \text{Nihai Enerji} \times \text{Doluluk Oranı} / \text{Aktivite} \quad (5.2)$$

Çizelge 5.3. TUSEM'in verilerinin kalibrasyonu

	Araç Sayısı (Adet)	Yıllık Ortalama km	Araç km (bin)	Yolcu Doluluk Oranı-Yük Kapasite Faktörü	Aktivite (bin)	Özel Enerji Tüketimi (kWh/km)	Nihai Enerji Tüketimi (GWh)
Özel Araçlar	12.398.190	13.776	70.800.872	1,9	24.521.657	0,660	110.426
Dizel	4.612.847	17.691	81.604.162	1,9	55.047.908	0,570	46.500
Benzin	3.089.626	10.399	32.129.599	1,9	61.046.239	0,647	20.779
Gaz	4.695.717	12.153	57.067.111	1,9	108.427.511	0,756	43.147
Dizel_Hibrit	-	17.691	-	1,9	-	0,438	-
Benzin_Hibrit	-	10.399	-	1,9	-	0,460	-
Elektrik	-	10.399	-	1,9	-	0,180	-
Hidrojen	-	10.399	-	1,9	-	0,337	-
Motosikletler	3.211.328	3.960	12.716.670	1,1	13.988.337	0,230	2.925
Benzin	3.211.328	3.960	12.716.670	1,1	13.988.337	0,230	2.925
Elektrik	-	3.960	-	1,1	-	0,071	-
Otobüs ve Minibüsler	706.050	33.809	23.870.559	18,9	452.097.578	2,445	58.372
Dizel	694.012	33.809	23.463.561	18,9	444.389.219	2,450	57.486
Gaz	12.038	33.809	406.998	18,9	7.708.360	2,176	886
Elektrik	-	33.809	-	12,0	-	0,971	-
Hidrojen	-	33.809	-	12,0	-	1,939	-
Yolcu Trenleri	462	93.716	43.335	182,5	8.938.000	10,513	553
Metro_Elektrik	58	85.000	4.906	250,0	1.226.550	6,144	30
Tren_Dizel	309	80.000	24.748	120,0	2.969.782	6,857	170
Tren_Elektrik	10	90.000	930	300,0	278.888	6,792	6
Tren-Hidrojen	-	40.000	-	250,0	-	0,827	-
HızlıTren Elektrik	85	150.000	12.751	350,0	4.462.781	27,237	347
Yolcu Deniz Araçları	308	29.594	9.128	200,0	1.825.500	95,588	872
Petrol	308	29.594	9.128	200,0	1.825.500	95,588	872
Gaz	-	29.594	-	200,0	-	31,526	-
Elektrik	-	14.797	-	200,0	-	10,062	-
Hidrojen	-	14.797	-	200,0	-	18,446	-
Yolcu Uçakları	490	582.758	285.632	120,0	34.275.837	50,781	14.505
Kerosen	490	582.758	285.632	120,0	34.275.837	50,781	14.505
Hibrit	-	320.726	-	120,0	-	36,968	-
Elektrik	-	240.544	-	120,0	-	23,154	-
FRBNK	2.333	39.825	92.916	30.000,0	2.787.494.889	121,136	11.256
Ağır Yük Araçlar	845.462	42.791	36.177.970	7,4	266.510.379	2,265	81.938
Dizel	845.462	42.791	36.177.970	7,4	266.510.379	2,265	81.938
Gaz	-	42.791	-	7,4	-	2,742	-
Elektrik	-	42.791	-	7,4	-	0,715	-
Hidrojen	-	42.791	-	7,4	-	1,876	-
Hafif Yük Araçlar	3.818.939	16.622	63.476.769	0,7	45.410.204	0,796	50.520
Dizel	3.570.943	16.624	59.362.630	0,7	42.279.344	0,791	46.950
Benzin	247.996	16.590	4.114.139	0,8	3.130.860	0,868	3.570
Gaz	-	16.624	-	0,7	-	0,874	-
Dizel_Hibrit	-	16.624	-	0,7	-	0,181	-
Benzin_Hibrit	-	16.624	-	0,7	-	0,185	-
Elektrik	-	16.624	-	0,7	-	0,248	-
Hidrojen	-	16.624	-	0,7	-	0,307	-
Yük Trenleri	472	95.430	45.005	323,1	14.481.000	41,343	1.860
Dizel	318	100.000	31.765	310,0	9.847.080	41,250	1.310
Elektrik	154	86.000	13.240	350,0	4.633.920	41,535	550
Hidrojen	-	50.000	-	350,0	-	35,706	-
Yük Deniz Araçları	641	51.440	32.973	900,0	29.675.641	113,759	3.751
Petrol	641	51.440	32.973	900,0	29.675.641	113,759	3.751
Gaz	-	30.280	-	900,0	-	102,306	-
Elektrik	-	16.187	-	900,0	-	38,763	-
Hidrojen	-	16.187	-	900,0	-	57,955	-

Buna göre, model 2018 baz yılı için çalıştırılmış ve 2018 Türkiye Enerji Dengesi Tablosuna göre kalibre edilmiştir.

5.4. Senaryoların Tasarımı ve Temel Varsayımlar

Bu çalışmada net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için mevcut ve yeni politikalar altında ulaştırma sektörünün nasıl konumlandırılabilceği amaçlanmaktadır. Bu amaçla Türkiye Enerji Sistemi Modeli (TESM) tabanlı tasarlanan Türkiye Ulaştırma Sektörü Enerji Modeli (TUSEM) ile ulaştırma sektörü analiz edilmekte ve sonuçlar iki ana senaryo olmak üzere çeşitli alt senaryolar altında sunulmaktadır.

1. Mevcut Politikalar Senaryosu (MPS)

- Mevcut ulaştırma sektörü politikalarını ve buna göre gelecekteki politikalar için ölçülü hedefleri belirtmekte,
- Baz yıl ulaşım tercihleri korunmuş ve ulaşım tercihleri değişmiş 2 alt senaryodan

2. Net Sıfır Emisyon Senaryosu (NSES)

- AB'nin düşük karbonlu ve iddialı ulaştırma sektörü politikalarını belirtmekte,
- Baz yıl ulaşım tercihleri korunmuş ve ulaşım tercihleri değişmiş 2 alt senaryo ve bu alt senaryoların her birinde yeni politikaların ayrı ayrı ve bütüncül uygulandığı 4 alt senaryo olmak üzere toplam 8 senaryodan

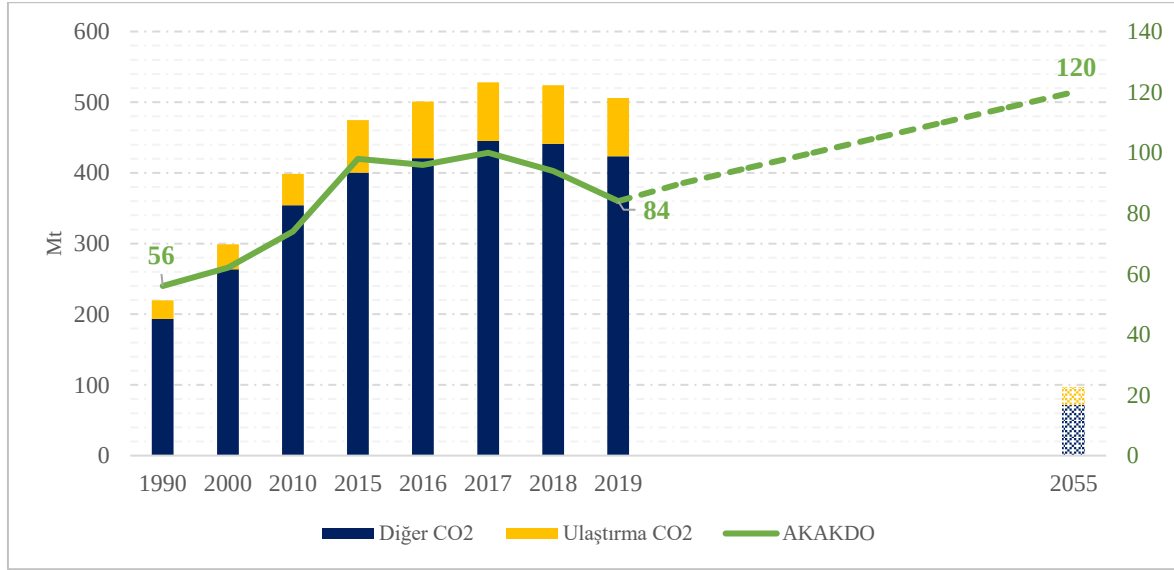
oluşmaktadır. Buna göre Çizelge 2.9 ve Çizelge 2.10 'daki politikalar kapsamında AB'de halen uygulanmakta olan ve Fit for 55 modelleme çalışmalarında da uygulanan politikaların Türkiye koşulları da dikkate alınarak hazırlanan politikalar ve senaryo dağılımları Çizelge 5.4'de gösterilmektedir. Çizelge 5.4'deki ulaştırma modlarının SB-SD seviyelerindeki aktivite dağılımları dışsal olarak girilmiştir. Bu dağılımlarda Ulaştırma ve Lojistik Ana Planı 2053'de yer alan hedefler ve ek olarak AB için yapılan Referans Senaryo 2020 çalışması ile Fit for 55 Senaryo çalışmasındaki gelişmiş ülkelerin ulaşım modlarının pkm ve tkm oranları ortalamaları dikkate alınmıştır. SAF'ın havacılık yakıtındaki harmanlama oranı, Avrupa Komisyonu'nun ReFuelEU Havacılık yönetmeliği önerisine göre (Skov ve Schneider, 2022) 2025'te %2'den 2030'da %5'e ve 2050'de %63'e çıkaran Fit for 55 girişiminin bir parçası olarak NSES ve NSES_mod'da kullanılmaktadır. Buna göre hem EU6 CO₂ standartları hem de SAF politikaları nedeniyle gelecekte alternatif bir uygulama olarak görülebilecek karbon fiyat uygulamaları modelde uygulanmamıştır.

Çizelge 5.4. Model senaryoları ve politika eylemleri

Politikalar		Senaryolar									
		NSE*	NSE	NSE_ ban	NSE_ eu6	NSE_ baneu6	NSE*_ baneu6	NSE*_ ban	NSE*_ eu6	MPS	MPS*
Ulaştırma Türü ve Mod Bazında	Havayolu hariç yolcu taşımacılığı pkm'sindeki araçların payları: Özel araçlar için %66'ya ve trenler için %9'a artırılması, Otobüs ve Minibüsler için %25'e azaltılması	✓					✓	✓	✓		✓
	Yük taşımacılığı tkm'de araçların payları: Karayolu araçları için %55'e azaltılması, trenler için %30 ve Denizyolu Araçları için %15 artırılması	✓					✓	✓	✓		✓
	Hava Yolcu taşımacılığının payının %12'ye çıkarılması	✓					✓	✓	✓		✓
	Mevcut Araç Modlarının paylarında değişiklik yok		✓	✓	✓	✓				✓	
	2035 yılına kadar toplam araç sayısı içinde elektrikli araç sayısının %15 olması									✓	✓
Yakıt ve Teknoloji Bazında	2035 (Demiryolu Araçları) - 2040 (PSPRV-LDV) -2045 (PSPRD) - 2050 (HDV) Yıllarından itibaren İçten Yanmalı Motor Teknolojilerinin Yasaklanması	✓	✓	✓		✓	✓	✓			
	2030 yılına kadar Biyoyakıt kullanımını %5'e çıkarmak, Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF) payını 2055 yılına kadar kademeli olarak %65'e çıkarmak ve 2070 yılına kadar bu oranı sabit tutmak	✓	✓								
	Biyoyakıt kullanımının 2030 yılına kadar %5'e çıkarılması ve bu oranı 2070 yılına kadar sabit kalması			✓	✓	✓	✓	✓	✓		
	EU6 ve AB'de yüzde azaltma hedefleri şeklinde 2030'dan itibaren CO ₂ standartlarının güncellenmesi (ilgili standartlarda 2025'e kadar %15, 2030'a kadar %30 azalma)	✓	✓		✓	✓	✓		✓		
	Motor teknolojisi yasağı yok, CO ₂ standardı yok									✓	✓
	Biyoyakıt kullanımının 2040 yılına kadar %5'e çıkarılması ve bu oranın 2070 yılına kadar sabit kalması									✓	✓
	2020 ve daha önce sisteme giren ICE teknolojisine sahip araçların 2040 yılında sistemden çıkarılması	✓	✓								

Net sıfır emisyon hedefi için belirleyici bir gösterge olacak AKAKDO emisyonları bu çalışmada belirli varsayımlar altında yer almaktadır. 2019 yılında Türkiye'de yaklaşık 506 Mt CO₂ emisyonu gerçekleşmiştir. Bu miktarın sektörlere göre dağılımı şu şekildedir. Toplam emisyonların yaklaşık %70'i enerji kaynaklı emisyonlardan oluşmakta ve enerji sektöründe yer alan elektrik ve ulaştırma alt sektörleri sırasıyla toplam emisyonların yaklaşık %30 ve %16'sını oluşturmaktadır (Eurostat, 2022a). Buna göre bu çalışmada, uzun vadede ulaştırma sektörü emisyonlarının toplam emisyonlar içindeki payının Avrupa Birliği (AB) ortalamaları olan %20-25 seviyelerine yaklaşacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca ulaştırma sektörü emisyonlarının AKAKDO emisyonları içindeki payının da bu paylarla uyumlu olacağı varsayılmaktadır. 2019 yılında Türkiye'nin AKAKDO emisyonları 1990 yılına göre

%50 artarak 84 Mt CO₂-e'ye ulaşmıştır (UNFCCC, 2022a). Bu çalışmada 2055 yılında da benzer oranda bir artış miktarı varsayılarak söz konusu yutak alan potansiyelinin karbon tutma miktarının yaklaşık 120 Mt CO₂-e'ye çıkacağı varsayılmaktadır. Türkiye'de yapılan benzer iki çalışmada net sıfır senaryosu için karbon tutma miktarının 2050 yılı için yaklaşık 120 ve 130 Mt CO₂-e çıkacağı varsayılmıştır (SÜ, 2022; World Bank, 2022d).



Şekil 5.4. Yıllar boyunca Türkiye'deki yutak alanların karbon tutma miktarı

Modelde araç modları ve kullandıkları yakıtlar bazında bazı varsayımlar şu şekildedir. Benzin, ağırlıklı olarak özel otomobillerde, 2 tekerlekli ve az oranda hafif hizmet yük taşıma araçlarında tüketilmektedir. Türkiye'deki yeni hafif ticari araçlar tamamen dizel yakıtla çalışmaktadır. LPG özel araçlarda, toplu taşıma araçlarında (otobüsler, yolcu otobüsleri (CNG olarak)) ve hafif hizmet yük taşıma araçlarında tüketilmektedir. Otomobillerde gaz kullanımı büyük oranda LPG ile çalışacak şekilde dönüştürülmüş olup, bu tür gazlı araçlarda benzin tüketimi çok az olduğu için göz ardı edilmiştir. TÜİK'e göre, özel otomobillerin en büyük payı LPG ve dizeldir (yaklaşık %73). Karayolu taşımacılığında 2018 yılı için hiçbir elektrikli araç rapor edilmemiştir. Ağır vasıtalar sadece dizel ile çalışmaktadır. Türkiye'nin geleneksel demiryolu ağının % 23'ü elektrikli hale getirilmiştir (2017). Kargo vagonlarını çeken elektrikli lokomotiflerin payı son yıllarda önemli derecede genişlemiştir. 2010 yılında yük trenlerinin sadece %5'i elektrikli lokomotifler tarafından çekilirken, 2015'te elektrikli kargo lokomotifinin payı %21'e yükselmiştir. Jet kerosen havacılık için tüketilen tek yakıt olarak, fuel oil ise su taşımacılığında tüketilen tek yakıt olarak alınmıştır.

6. UYGULAMA

Bu bölümde yolcu ve yük taşımacılığı faaliyeti, CO₂ emisyonları, nihai enerji talebi, ulaştırma sektörünün elektrifikasyonunun arz sistemine etkisi ve ulaşım sistemi maliyetleri ile ilgili sonuçlar sunulmaktadır.

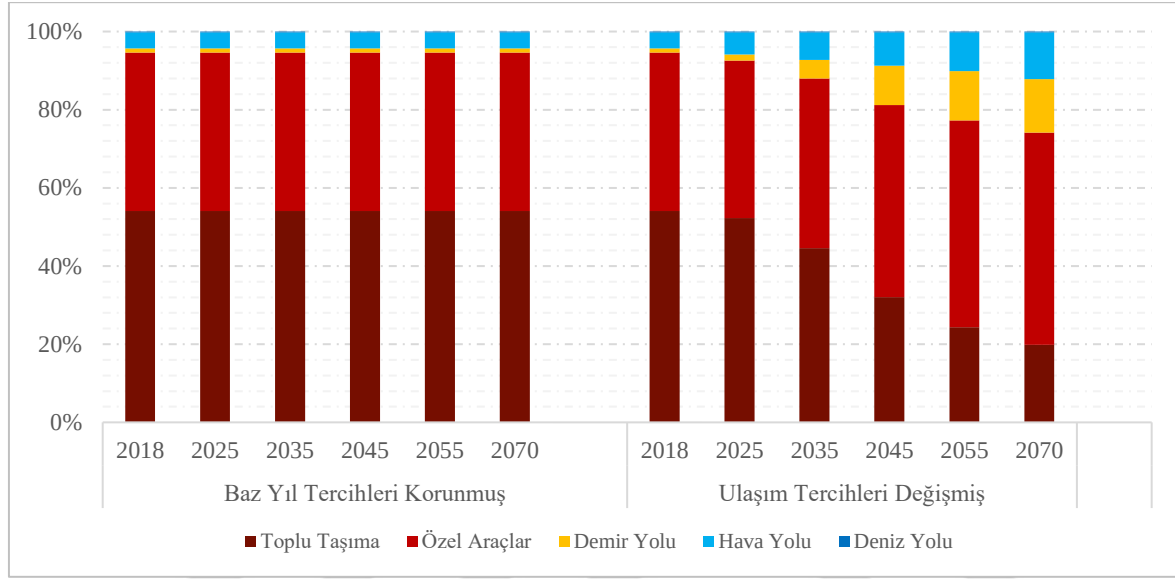
6.1. Yolcu ve Yük Talebi Aktiviteleri Gelişimi

Dördüncü bölümde bahsedildiği gibi modelin SB ve SD seviyeleri arasında pkm ve tkm dağılımları dışsal olarak belirlenmektedir. Buna göre beşinci bölümde de bahsedildiği gibi söz konusu dağılımlarda Ulaştırma ve Lojistik Ana Planı 2053’de yer alan hedefler, AB için yapılan Referans Senaryo 2020 ile Fit for 55 Senaryo çalışmalarındaki gelişmiş ülkelerin ulaşım türlerinin pkm ve tkm oranları ve ülke politikaları dikkate alınmıştır. Bu anlamda söz konusu dağılımlar iki senaryo altında değerlendirilmiştir. Bu senaryoların ilkinde baz yıl olan 2018 yılındaki dağılımlarda tahmin yılları boyunca yolcu taşımacılığında ulaştırma türü ve mod dağılımlarında önemli değişikliklerin olmayacağı; ikincisinde ise yolcu taşımacılığında demiryolu ve hava yolu taşımacılığı türleri ve kara yolu taşımacılığında özel araç modunun oranlarının, yük taşımacılığında ise demir yolu ve deniz yolu taşımacılığı türleri oranlarının tahmin yılları boyunca AB standartlarına yaklaşacağı varsayılmıştır.

Çizelge 6.1. Yolcu km’nin ulaştırma türlerine göre gelişimi (milyon)

	Yıllar	Yolcu Aktivite	Toplu Taşıma	Özel Araçlar	Demir Yolu	Hava Yolu	Deniz Yolu
Baz Yıl Ulaşım Tercihleri Korunmuş	2018	835.647	452.085	338.437	9.192	34.262	1.671
	2025	818.942	443.048	331.672	9.008	33.577	1.638
	2035	980.013	530.187	396.905	10.780	40.181	1.960
	2045	1.124.222	608.204	455.310	12.366	46.093	2.248
	2055	1.169.899	632.915	473.809	12.869	47.966	2.340
	2070	1.183.098	640.056	479.155	13.014	48.507	2.366
	2018	%	54,10%	40,50%	1,10%	4,10%	0,20%
	2025		54,10%	40,50%	1,10%	4,10%	0,20%
	2035		54,10%	40,50%	1,10%	4,10%	0,20%
	2045		54,10%	40,50%	1,10%	4,10%	0,20%
	2055		54,10%	40,50%	1,10%	4,10%	0,20%
	2070		54,10%	40,50%	1,10%	4,10%	0,20%
	2018	835.647	452.098	338.510	8.938	34.276	1.826
	2025	818.942	428.077	330.122	12.457	46.527	1.760
	2035	980.013	436.538	425.582	46.381	69.438	2.075
	2045	1.124.222	359.813	552.828	113.795	95.442	2.344
	2055	1.169.899	284.568	619.163	148.018	115.747	2.402
	2070	1.183.098	234.300	642.775	161.679	141.972	2.372
	2018	%	54,1%	40,5%	1,1%	4,1%	0,2%
Ulaşım Tercihleri Değişmiş	2025		52,3%	40,3%	1,5%	5,7%	0,2%
	2035		44,5%	43,4%	4,7%	7,1%	0,2%
	2045		32,0%	49,2%	10,1%	8,5%	0,2%
	2055		24,3%	52,9%	12,7%	9,9%	0,2%
	2070		19,8%	54,3%	13,7%	12,0%	0,2%

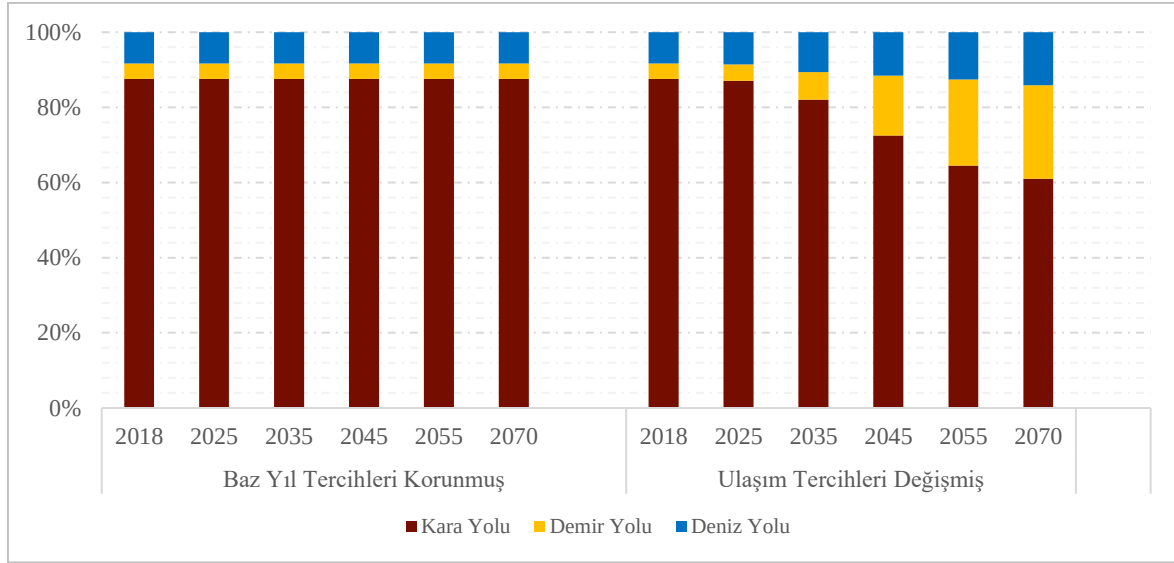
Özellikle yük taşımacılığında aktivite, ağırlıklı olarak demiryolu ve deniz yolu taşımacılığına doğru kaymaktadır ve karayolu yük taşımacılığı faaliyetleri önemli ölçüde azalmaktadır. Bu anlamda yolcu ve yük taşıma türlerine göre “Baz Yıl Korunmuş” ve “Mod Değişikliği” senaryolarının aktivite gelişimi Çizelge 6.1 ve Şekil 6.1 ile Çizelge 6.2 ve Şekil 6.2.’de gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Ulaştırma türlerine göre yolcu km'nin tahmin döneminde dağılımı

Çizelge 6.2. Ton km'nin Ulaştırma Türlerine Göre Gelişimi (bin)

	Yıllar	Yük Aktivite	Kara Yolu	Demir Yolu	Deniz Yolu
Baz Yıl Ulaşım Tercihleri Korunmuş	2018	355.793	311.637	14.481	29.676
	2025	477.640	418.356	19.442	39.842
	2035	646.543	566.276	26.325	53.942
	2045	778.948	682.230	31.722	64.996
	2055	851.425	745.708	34.674	71.043
	2070	947.489	829.867	38.579	79.044
	2018	%	87,6%	4,1%	8,3%
	2025		87,6%	4,1%	8,3%
	2035		87,6%	4,1%	8,3%
	2045		87,6%	4,1%	8,3%
	2055		87,6%	4,1%	8,3%
	2070		87,6%	4,1%	8,3%
Ulaşım Tercihleri Değişmiş	2018	355.793	311.637	14.481	29.676
	2025	477.640	415.964	20.639	41.037
	2035	646.543	530.656	47.394	68.492
	2045	778.948	565.166	123.483	90.298
	2055	851.425	549.545	194.688	107.192
	2070	947.489	578.414	235.601	133.474
	2018	%	87,6%	4,1%	8,3%
	2025		87,1%	4,3%	8,6%
	2035		82,1%	7,3%	10,6%
	2045		72,6%	15,9%	11,6%
	2055		64,5%	22,9%	12,6%
	2070		61,0%	24,9%	14,1%



Şekil 6.2. Ulaştırma türlerine göre ton km'nin tahmin döneminde dağılımı

6.2. CO₂ Eşdeğeri Emisyonlar

Senaryolar arasındaki CO₂ emisyonları tüm NSES'lerde politika önlemleri ve ortaya çıkan elektrifikasyon ile önemli ölçüde farklılık göstermektedir (Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4).

Çizelge 6.3. Baz yıl ulaşım tercihleri korunmuş senaryolarda ulaşım türü emisyonları

Kt	Yıl	CO ₂ Emisyonu	Kara Yolu	Demir Yolu	Hava Yolu	Deniz Yolu
MPS	2018	82.667,1	77.313,7	388,5	3.754,4	1.210,6
	2025	92.903,6	87.290,2	488,4	3.573,3	1.551,7
	2035	115.411,0	108.562,3	683,8	4.114,2	2.050,6
	2045	129.603,0	121.641,0	873,6	4.648,3	2.440,1
	2055	131.129,7	122.812,4	917,7	4.762,9	2.636,8
	2070	129.325,0	120.756,5	980,3	4.704,0	2.884,2
NSE_eu6	2018	82.667,1	77.313,7	388,5	3.754,4	1.210,6
	2025	92.070,5	86.534,2	484,3	3.507,1	1.544,8
	2035	90.053,3	83.605,8	641,5	3.769,8	2.036,2
	2045	73.968,5	66.841,0	806,8	3.894,6	2.426,1
	2055	48.357,1	41.485,1	794,2	3.534,9	2.542,9
	2070	39.817,1	33.335,5	744,1	3.226,2	2.511,2
NSE_ban	2018	82.667,1	77.313,7	388,5	3.754,4	1.210,6
	2025	92.070,2	86.533,9	484,3	3.507,1	1.544,8
	2035	94.810,7	88.412,5	626,2	3.769,8	2.002,1
	2045	64.769,0	58.174,5	405,1	3.894,1	2.295,3
	2055	24.899,1	18.859,6	111,9	3.531,1	2.396,5
	2070	5.726,2	-	-	3.217,1	2.509,1
NSE_baneu6	2018	82.667,1	77.313,7	388,5	3.754,4	1.210,6
	2025	92.070,7	86.534,4	484,3	3.507,1	1.544,8
	2035	90.080,1	83.635,4	638,6	3.769,8	2.036,2
	2045	58.754,7	52.140,4	418,4	3.894,0	2.301,9
	2055	22.450,2	16.405,8	110,6	3.530,9	2.402,8
	2070	5.726,8	-	-	3.217,0	2.509,7
NSE	2018	82.667,1	77.313,7	388,5	3.754,4	1.210,6
	2025	92.072,0	86.535,7	484,4	3.507,1	1.544,8
	2035	89.674,9	83.708,0	638,6	3.292,7	2.035,5
	2045	57.316,8	52.564,7	418,5	2.039,8	2.293,8
	2055	20.638,0	16.783,8	110,7	1.352,6	2.390,9
	2070	3.717,8	-	-	1.217,7	2.500,1

Çizelge 6.3'e göre 2055 yılında MPS'de 131 Mt CO₂ olan ulaştırma sektörü emisyonu, sadece EU6 standartları politikasının uygulandığı NSE_eu6 senaryosunda yaklaşık 48 Mt CO₂'ye, sadece yeni ICE teknoloji girişlerinin engellenmesi politikasının uygulandığı NSE_ban senaryosunda ise yaklaşık 25 Mt CO₂'ye düşmektedir. Her iki politikanın uygulandığı NSE_baneu6 senaryosunda ise ulaştırma sektörü emisyonu yaklaşık 22 Mt CO₂'a düşmektedir.

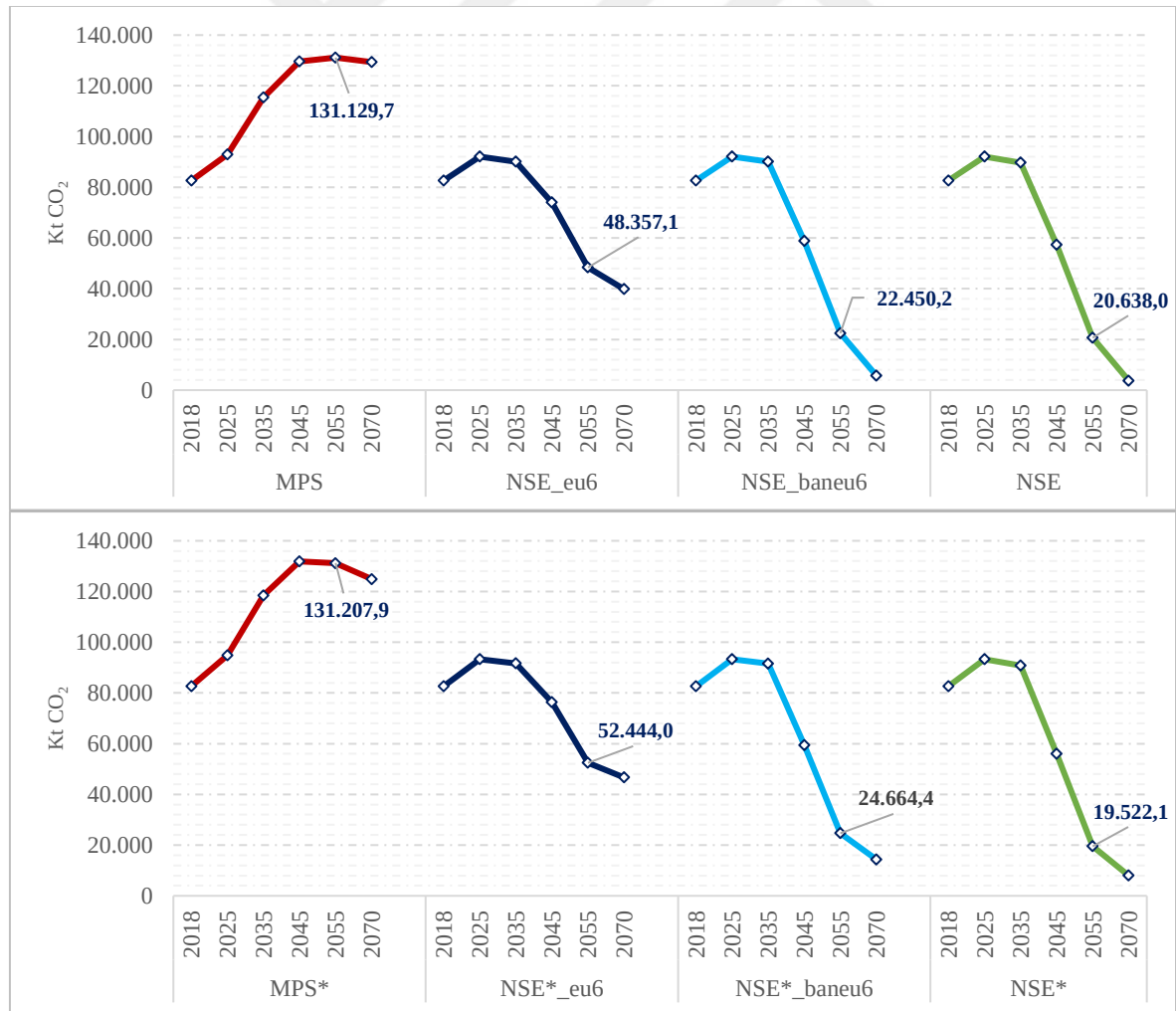
Çizelge 6.4. Ulaşım tercihleri değişmiş senaryolarda ulaşım türü emisyonları

Kt	Yıl	CO ₂ Emisyonu	Kara Yolu	Demir Yolu	Hava Yolu	Deniz Yolu
MPS*	2018	82.667,1	77.313,7	388,5	3.754,4	1.210,6
	2025	94.856,1	87.689,8	542,8	5.032,2	1.591,3
	2035	118.466,8	107.165,6	1.438,9	7.335,3	2.526,9
	2045	131.870,9	114.785,3	3.736,2	10.082,2	3.267,3
	2055	131.207,9	109.584,0	5.579,1	12.227,0	3.817,8
	2070	124.848,5	98.717,3	6.473,8	14.997,2	4.660,2
NSE*_eu6	2018	82.667,1	77.313,7	388,5	3.754,4	1.210,6
	2025	93.290,3	86.239,5	537,8	4.929,4	1.583,6
	2035	91.635,3	81.110,3	1.321,7	6.706,9	2.496,3
	2045	76.337,4	61.575,8	3.261,0	8.292,5	3.208,2
	2055	52.444,0	35.183,0	4.639,6	8.996,9	3.624,5
	2070	46.665,8	27.398,5	4.925,7	10.283,5	4.058,1
NSE*_ban	2018	82.667,1	77.313,7	388,5	3.754,4	1.210,6
	2025	93.290,5	86.239,7	537,8	4.929,4	1.583,6
	2035	96.020,6	85.650,1	1.206,7	6.706,9	2.456,8
	2045	65.169,5	52.821,0	995,8	8.292,0	3.060,6
	2055	26.793,7	13.804,4	528,6	8.995,5	3.465,2
	2070	14.336,0	-	-	10.281,9	4.054,2
NSE*_baneu6	2018	82.667,1	77.313,7	388,5	3.754,4	1.210,6
	2025	93.290,3	86.239,5	537,8	4.929,4	1.583,6
	2035	91.567,9	81.137,2	1.227,5	6.706,9	2.496,3
	2045	59.422,6	47.045,5	1.018,0	8.292,0	3.067,2
	2055	24.664,4	11.663,6	533,9	8.995,5	3.471,3
	2070	14.337,5	-	-	10.281,9	4.055,6
NES*	2018	82.667,1	77.313,7	388,5	3.754,4	1.210,6
	2025	93.291,8	86.240,9	537,9	4.929,4	1.583,6
	2035	90.811,1	81.229,9	1.227,9	5.858,0	2.495,3
	2045	55.981,4	47.572,3	1.018,5	4.332,9	3.057,8
	2055	19.522,1	12.091,9	534,4	3.439,8	3.456,0
	2070	7.943,3	-	-	3.903,0	4.040,3

*Ulaşım Tercihleri Değişmiş senaryoları vurgulamaktadır

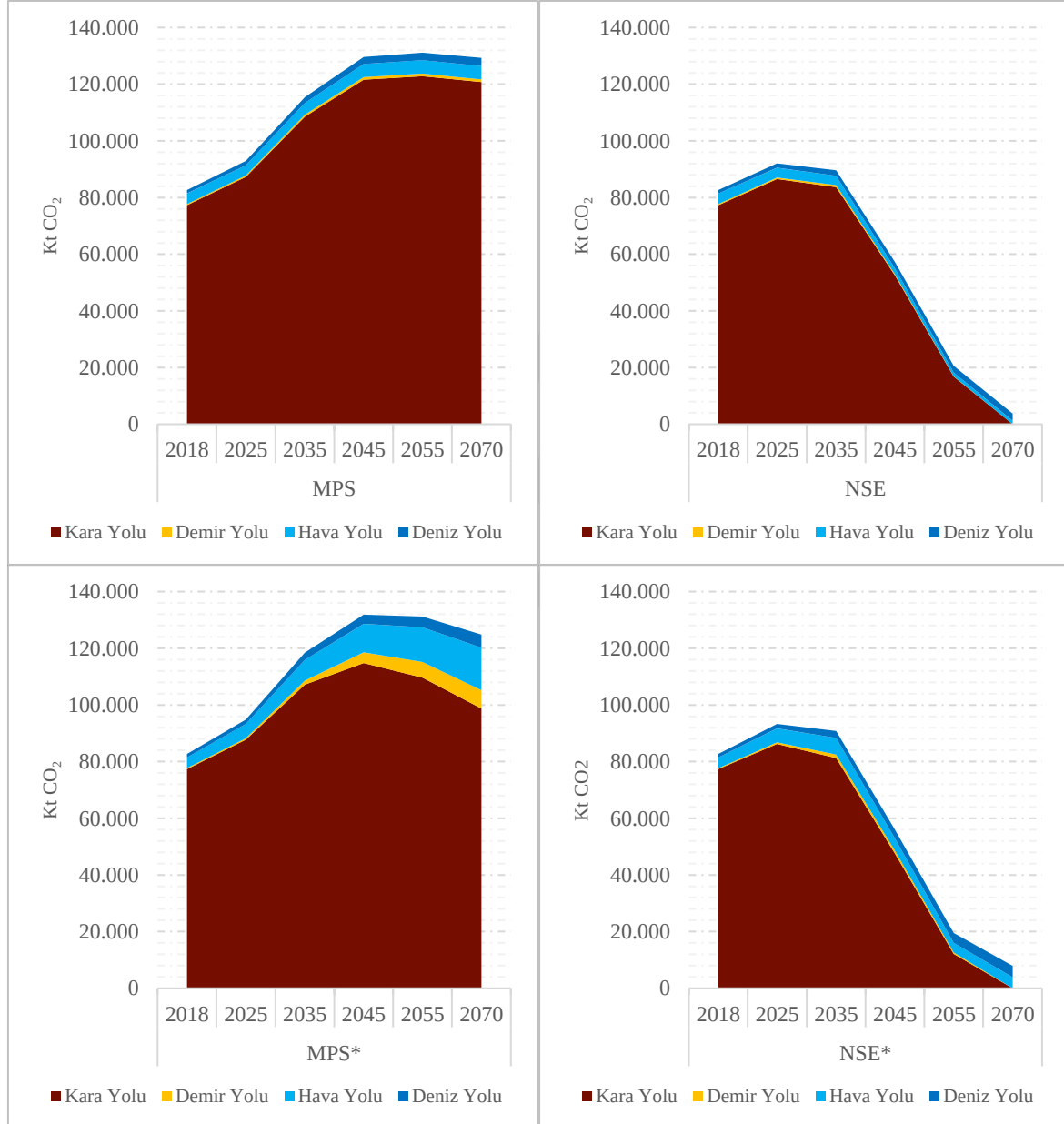
Çizelge 6.4'e göre 2055 yılında MPS**'de 131 Mt CO₂ olan ulaştırma sektörü emisyonu, sadece EU6 standartları politikasının uygulandığı NSE*_eu6 senaryosunda yaklaşık 52,5 Mt CO₂'ye, sadece yeni ICE teknoloji girişlerinin engellenmesi politikasının uygulandığı NSE*_ban senaryosunda ise yaklaşık 26,5 Mt CO₂'ye düşmektedir. Her iki politikanın uygulandığı NSE*_baneu6 senaryosunda ise ulaştırma sektörü emisyonu yaklaşık 24 Mt CO₂'ye düşmektedir. Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4 incelendiğinde EU6 standartlarının uygulandığı 2025-2035 yıllarında emisyonların ortalama %20 azaldığı, EU6 standartlarından bağımsız olarak 2035 yılından itibaren ICE motor teknolojilerinde yeni girişlerin engellenmesi ile 2035-2055 yıllarında emisyonların ortalama %75 azaldığı

görülmektedir. Buna göre petrol ithalatının ve bununla ilişkili olarak dış ticaret açığının azaltılması, elektrikli araçların ve elektrik enerjisinde temiz enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonu vb. politikalar kapsamında oluşturulacak emisyon azaltım politikaları için NSE_eu6 senaryolarının kısa vadeli hedeflerin etkinliği, NSE_ban senaryolarının ise uzun vadeli hedeflerin etkinliği için önemli senaryolar olduğu görülmektedir. Ancak uzun vadeli ülke hedeflerinde, söz konusu iki politikanın hem zamanlama hem de birbirine bağlı şekilde uygulanması yönünden birbirini tamamlayıcı özelliği bulunmaktadır. Tüm NSE senaryolarında 2030'larda zirve yapan emisyon miktarı 2040 yılında 2018 yılı seviyelerine ulaşmakta ve bu yıldan sonra yılda ortalama yaklaşık %7,5 azalarak 2055 yılında ortalama 25 Mt CO₂ seviyelerine gerilemektedir. Ayrıca uygulanan bu iki politikaya ek olarak havacılıkta SAF'ın kullanımının artırılmasıyla beraber NSE* senaryosunda 2055 yılında yaklaşık 19 Mt CO₂'a gerileyen ulaştırma sektörü emisyonunun 2018 yılına göre toplamda %76 oranında azalma göstereceği öngörülmektedir (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. Senaryolar bazında toplam ulaştırma emisyonlarının gelişimi

2018 yılında karayolu taşımacılığı, ulaştırma sektörü emisyonlarının yaklaşık %93'sini oluşturmaktadır. 2055 yılında bu oran MPS'de aynı kalmakta, NSE'de ise %81 seviyelerine gerilemektedir. Ulaşım tercihinin değişmesinin baz alındığı senaryolarda ise 2055 yılında bu oran MPS*'de %83'e, NSE*'de ise %61 seviyelerine gerilemektedir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4. Senaryolar bazında ulaştırma türü emisyonları

Buna göre ulaşım tercihi değişikliği karayolu yolcu taşımacılığında toplu taşımadan elektrifikasyonun daha hızlı gerçekleştiği binek araç taşımacılığına kaydığı için emisyonlar daha keskin bir şekilde azalmaktadır. Yük taşımacılığında ise söz konusu ulaşım tercihi değişikliği ulaştırma türü bazında gerçekleştiği ve özellikle elektrifikasyonun yoğun olduğu

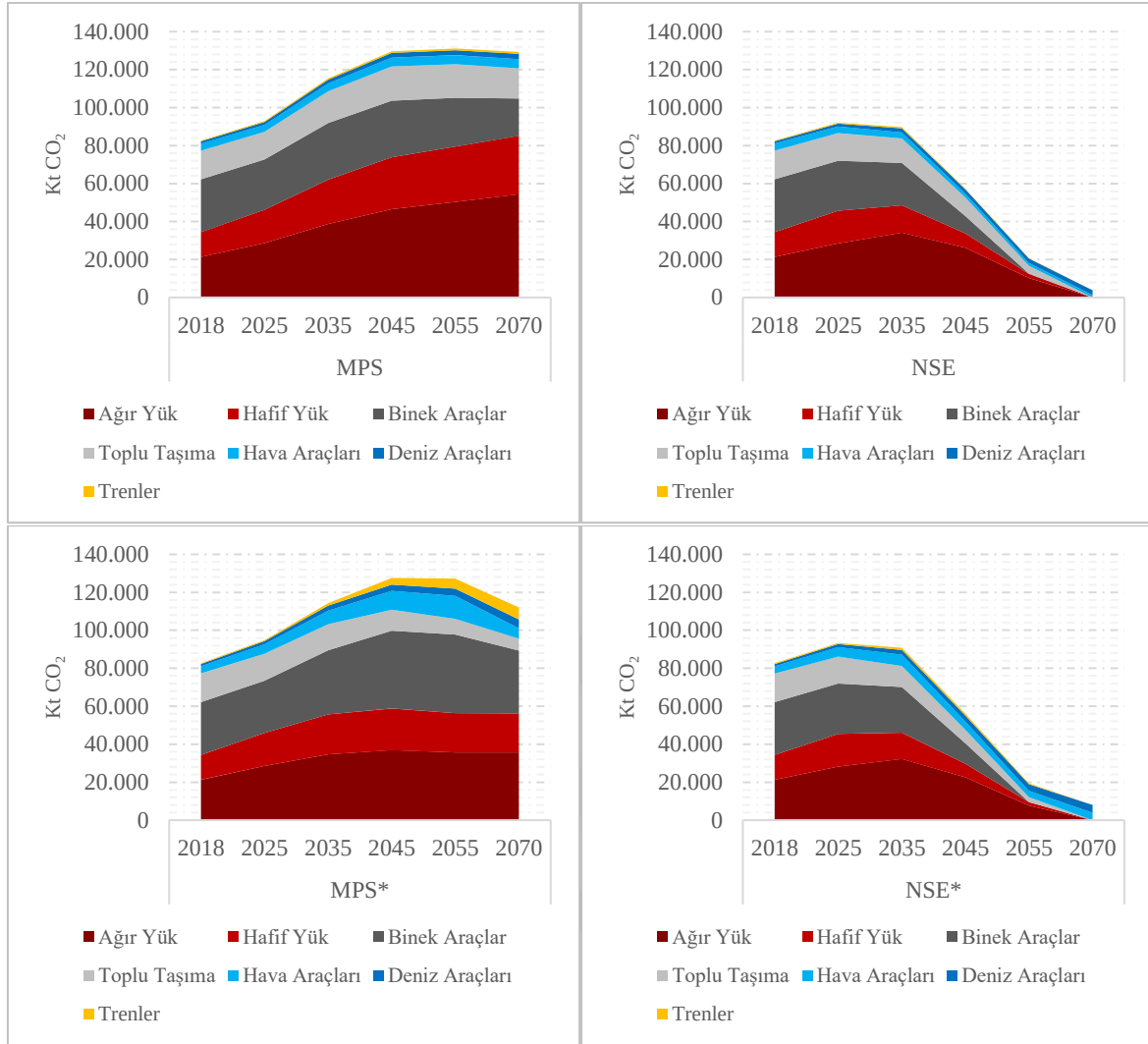
demir yolu taşımacılığına kaydığı için emisyonlar aynı şekilde daha keskin bir şekilde azalmaktadır. Hava taşımacılığında SAF kullanımına rağmen aktiviteye dayalı nihai enerji tüketimindeki artış nedeniyle emisyon azalması gerçekleşmemekte ve 2055 yılından sonra ortaya çıkan emisyonların büyük bölümünü hava yolu taşımacılığı oluşturmaktadır. Ancak SAF kullanımı emisyonların artış hızını, aktivitedeki dikkat çeken artışa rağmen önemli oranda dengelemektedir.

6.2.1. Ulaştırma moduna göre emisyonlar

Senaryolar arasında, ulaştırma modu emisyonlarında tüm yıllar boyunca emisyon azaltımlarındaki en çarpıcı fark 27 Mt CO₂ ile binek araçlardır. Bu modu toplam 24 Mt CO₂ ile ağır ve hafif yük hizmet sınıfında bulunan araçlar ve 12,6 Mt CO₂ ile toplu taşıma araçları takip etmektedir (Çizelge 6.5). En düşük emisyon azaltımı ulaşım modu, aktivite nedeniyle nihai enerji tüketimini arttıran 0,3 Mt CO₂ ile uçaklardır. Bununla birlikte, havacılıkta SAF kullanımının emisyonlarda önemli bir artışı önlediği değerlendirilmektedir. Deniz yolu taşımacılığında ise herhangi bir politika uygulanmadığı için aktiviteye dayalı nihai enerji tüketimindeki artış nedeniyle emisyon miktarı 3,3 kat artış göstermektedir.

Çizelge 6.5. Senaryolar bazında ulaştırma moduna göre emisyon miktarları

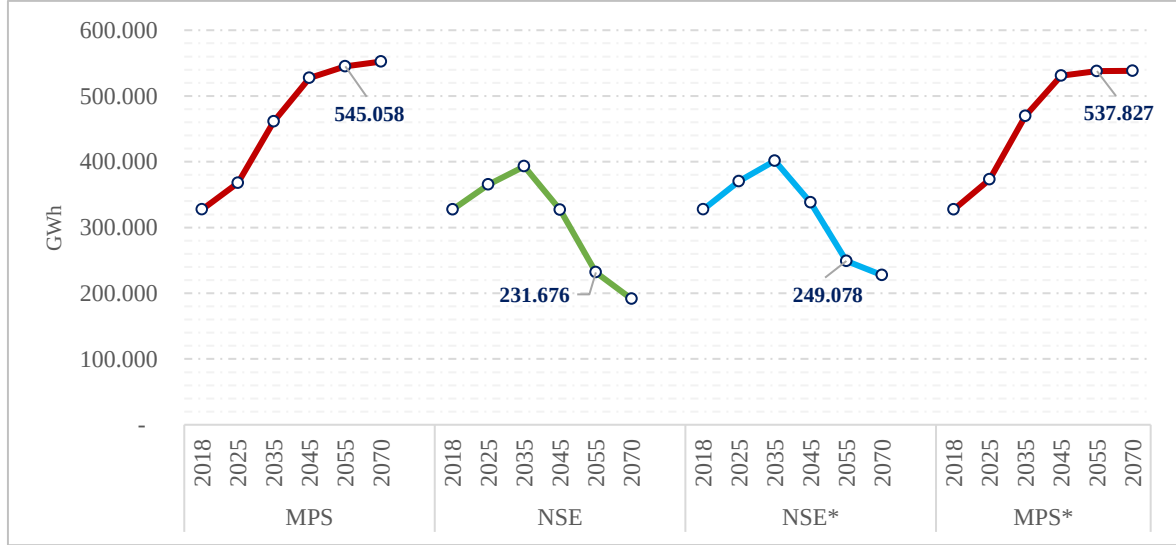
Kt		Ağır Yük Araçlar	Hafif Yük Araçlar	Binek Araçlar	Toplu Taşıma	Hava Araçları	Deniz Araçları	Trenler	Toplam
MPS	2018	21.326,9	13.029,1	27.818,0	15.139,7	3.754,4	1.210,6	388,5	82.667,1
	2025	28.653,3	17.489,8	26.570,7	14.576,5	3.573,3	1.551,7	488,4	92.903,6
	2035	38.780,2	23.275,2	29.785,2	16.721,8	4.114,2	2.050,6	683,8	115.411,0
	2045	46.459,0	27.451,8	29.665,2	18.065,0	4.648,3	2.440,1	873,6	129.603,0
	2055	50.309,4	29.191,4	25.688,0	17.623,5	4.762,9	2.636,8	917,7	131.129,7
	2070	54.354,7	30.822,6	19.622,7	15.956,4	4.704,0	2.884,2	980,3	129.325,0
NSE	2018	21.326,9	13.029,1	27.818,0	15.139,7	3.754,4	1.210,6	388,5	82.667,1
	2025	28.455,1	17.249,0	26.321,7	14.509,9	3.507,1	1.544,8	484,4	92.072,0
	2035	34.136,6	14.378,8	22.295,5	12.897,2	3.292,7	2.035,5	638,6	89.674,9
	2045	26.097,5	7.730,7	9.068,6	9.667,9	2.039,8	2.293,8	418,5	57.316,8
	2055	10.334,3	2.086,1	90,8	4.272,7	1.352,6	2.390,9	110,7	20.638,0
	2070	-	-	-	-	1.217,7	2.500,1	-	3.717,8
MPS*	2018	21.326,9	13.029,1	27.818,0	15.139,7	3.754,4	1.210,6	388,5	82.667,1
	2025	28.484,1	17.389,8	27.499,3	14.316,7	4.994,7	1.591,3	542,8	94.818,6
	2035	34.739,8	20.925,9	33.820,0	13.710,2	7.226,4	2.526,8	1.369,0	114.318,1
	2045	36.912,4	21.875,3	41.013,3	11.027,2	9.932,5	3.267,2	3.555,1	127.583,1
	2055	35.649,2	20.682,4	41.394,8	8.347,8	12.045,5	3.817,7	5.308,6	127.246,0
	2070	35.657,0	20.562,2	33.018,4	6.448,4	5.448,3	4.660,1	6.160,1	111.954,5
NSE*	2018	21.326,9	13.029,1	27.818,0	15.139,7	3.754,4	1.210,6	388,5	82.667,1
	2025	28.292,8	17.154,1	26.538,8	14.255,2	4.929,4	1.583,6	537,9	93.291,8
	2035	32.246,9	13.811,6	24.057,1	11.114,4	5.858,0	2.495,3	1.227,9	90.811,1
	2045	22.540,7	7.179,7	10.779,7	7.072,1	4.332,9	3.057,8	1.018,5	55.981,4
	2055	7.683,0	1.788,0	101,5	2.519,3	3.439,8	3.456,0	534,4	19.522,1
	2070	-	-	-	-	3.903,0	4.040,3	-	7.943,3



Şekil 6.5. Senaryolar bazında ulaştırma moduna göre emisyon gelişimi

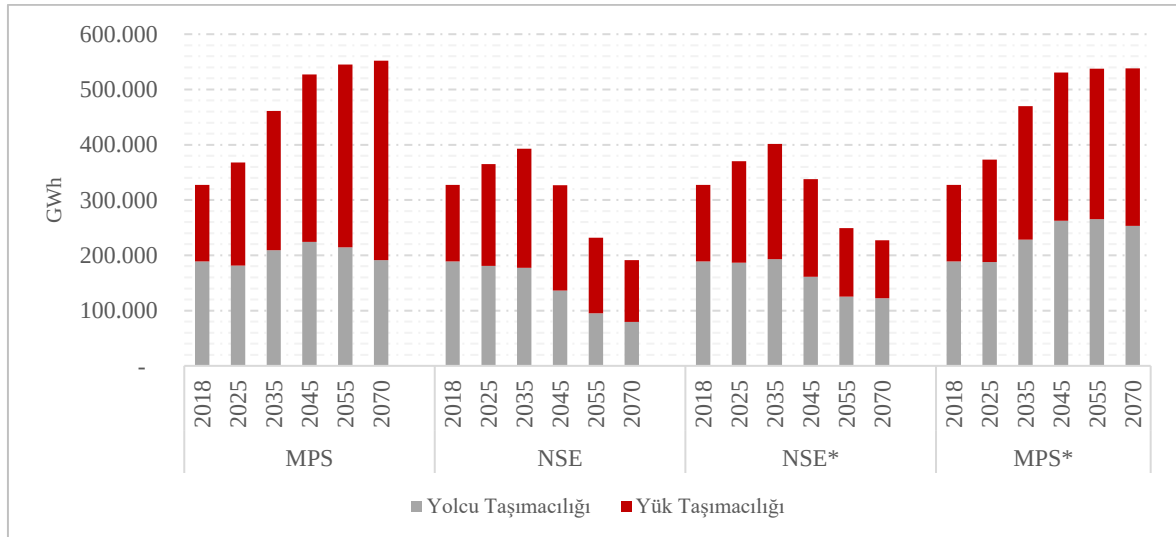
6.3. Yakıt Talebi Gelişimi

Toplam nihai enerji talebi iki referans senaryoda da artarken mod değişikliğinin hızlanması ile 2055 yılından sonra MPS* senaryosunda dengelenmeye ve azalmaya başlamaktadır. NSE senaryolarında ise nihai enerji tüketimi 2035 yılına kadar artarak zirveye ulaşmaktadır (Şekil 6.6). Bu yıla kadar nihai enerji tüketiminde MPS'ler ile NSES'ler arasındaki temel fark NSES'lerde EU6 standartlarının etkisidir. Nihai enerji tüketimi artış hızını yavaşlatan EU6 standartlarının 2035 yılı sonunda sağladığı elektrifikasyonun, enerji tüketimi azalışına etkisi yaklaşık olarak 60 TWh'dir. Bu değer TEP karşılığı yaklaşık olarak 5,1 MTEP'dir. NSES'lerde sonraki yıllarda ICE teknolojilerine yeni girişlerin kısıtlanması ve hava yolunda SAF kullanım oranının hızlı şekilde artmasının nihai enerji tüketimi azalışına etkisi 2055 yılında yaklaşık olarak 305 TWh'dir. Bu değer TEP karşılığı yaklaşık olarak 26 MTEP'dir.



Şekil 6.6. Senaryolara göre nihai enerji tüketimi gelişimi

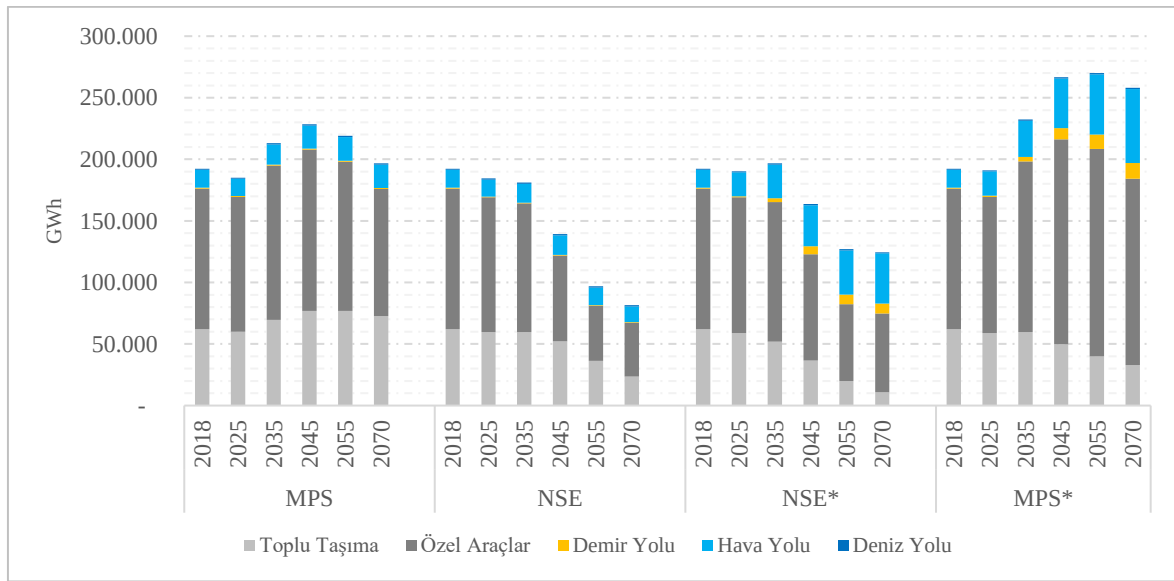
NSE senaryolarında nihai enerji talebindeki azalışın nedeni incelendiğinde ulaşım tercihi değişimine göre farklılıklar olduğu görülmektedir. Ulaştırma türü dağılımlarının baz yıl ulaşım tercihlerinin korunduğu MPS ile NSE senaryoları arasındaki nihai enerji tüketimi azalışının yaklaşık %62'sini yük taşımacılığı oluşturmaktadır. Ulaşım tercihi değişiminin dikkate alındığı MPS* ile NSE* senaryoları arasındaki nihai enerji tüketimi azalışının ise yaklaşık %51'ini yük taşımacılığı oluşturmaktadır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. Senaryolara göre yolcu ve yük taşımacılığı nihai enerji tüketimi gelişimi

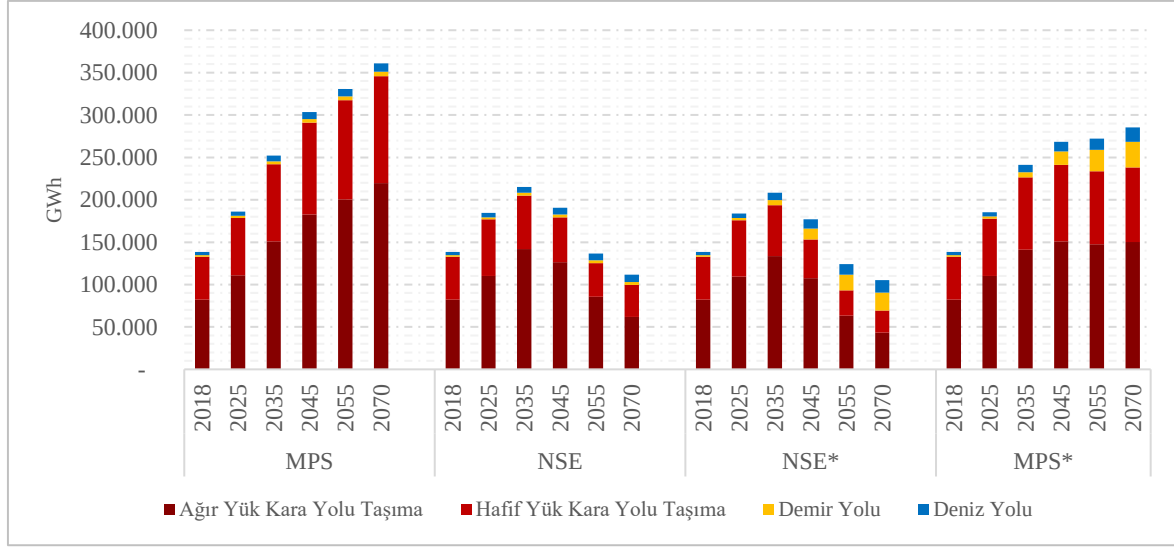
Yolcu taşımacılığında nihai enerji tüketimi ulaşım modları bazında incelendiğinde toplu taşıma ve binek araçların büyük oranda elektrifikasyonu 2055 yılında enerji tüketimini

yaklaşık olarak 125 TWh azaltmaktadır. Ulaşım tercihi değişimine göre tasarlanan MPS* ve NSE* senaryolarında bu değişim yaklaşık olarak 150 TWh'a çıkmaktadır (Şekil 6.8). Herhangi bir emisyon azaltım politikasının uygulanmadığı MPS ve MPS* senaryoları arasında yolcu taşımacılığında ulaşım tercihi değişiminin nihai enerji tüketimine etkisi yaklaşık 50 TWh'dır. Bu fark emisyon azaltım politikalarının uygulandığı NSE ve NSE* senaryolarında yaklaşık 25 TWh'dır. Buna göre ulaştırma sektöründe yolcu taşımacılığında kara yolu araçlarında elektrifikasyonun sağlanması ve hava yolunda SAF kullanımı, ulaşım tercihi değişiminden kaynaklı enerji tüketimi artışını önemli oranda dengelemektedir.



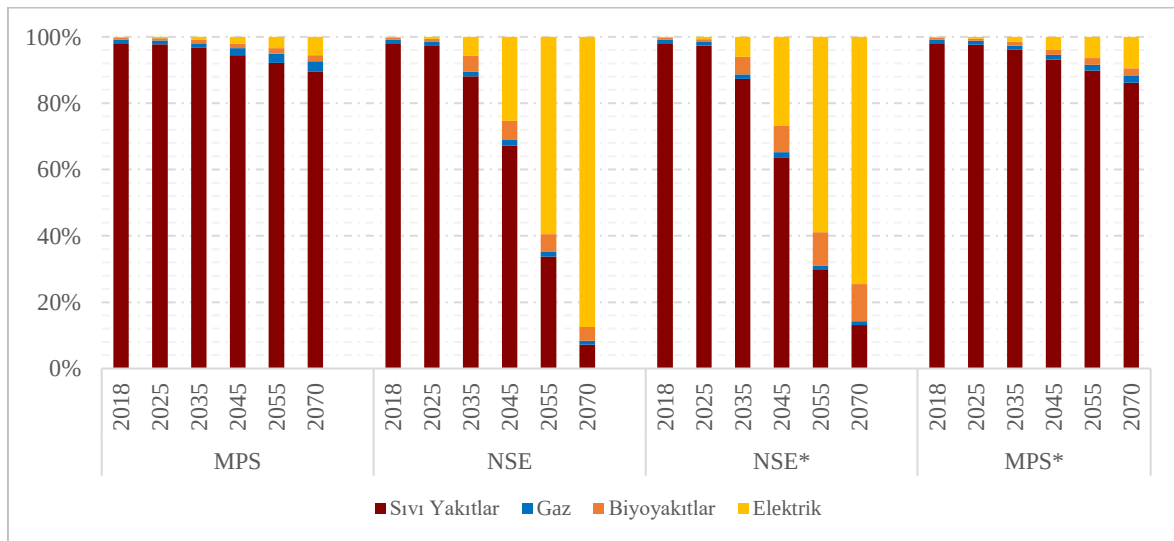
Şekil 6.8. Senaryolara göre yolcu taşımacılığı araç modları nihai enerji tüketimleri

Yük taşımacılığında nihai enerji tüketimi, ulaşım modları bazında incelendiğinde 2030 yılından sonra MPS'ler arasında mod değişimi kaynaklı enerji tüketimi farklılıkları oluşmaktadır. Özellikle demir yolu ulaşımının aşamalı olarak artan payı iki senaryo arasında 2055 yılında 60 TWh'lık enerji tüketimi farkı ortaya çıkarmaktadır (Şekil 6.9). NSE senaryolarında ise mod değişimi, toplam nihai enerji tüketimleri arasında anlamlı bir fark yaratmamakta ancak özellikle demir yolu taşımacılığının artan payıyla NSE* senaryosunda kara yolu araçlarının nihai enerji tüketimleri azalmaktadır. Bu durum NSE* ile NSE senaryoları arasında yük taşımacılığındaki bölüm 6.2'deki CO₂ emisyonları farkını ortaya çıkarmaktadır. MPS* ile NSE* senaryoları analiz edildiğinde yük taşımacılığının elektrifikasyonu 2055 yılında iki senaryo arasında 2,6 katlık nihai enerji tüketimi farkı yaratmaktadır. Ayrıca NSE* senaryosunda yirmi ve daha büyük yaşa sahip araçların ulaşım sisteminden çıkarılması da söz konusu farka katkı sağlamaktadır.



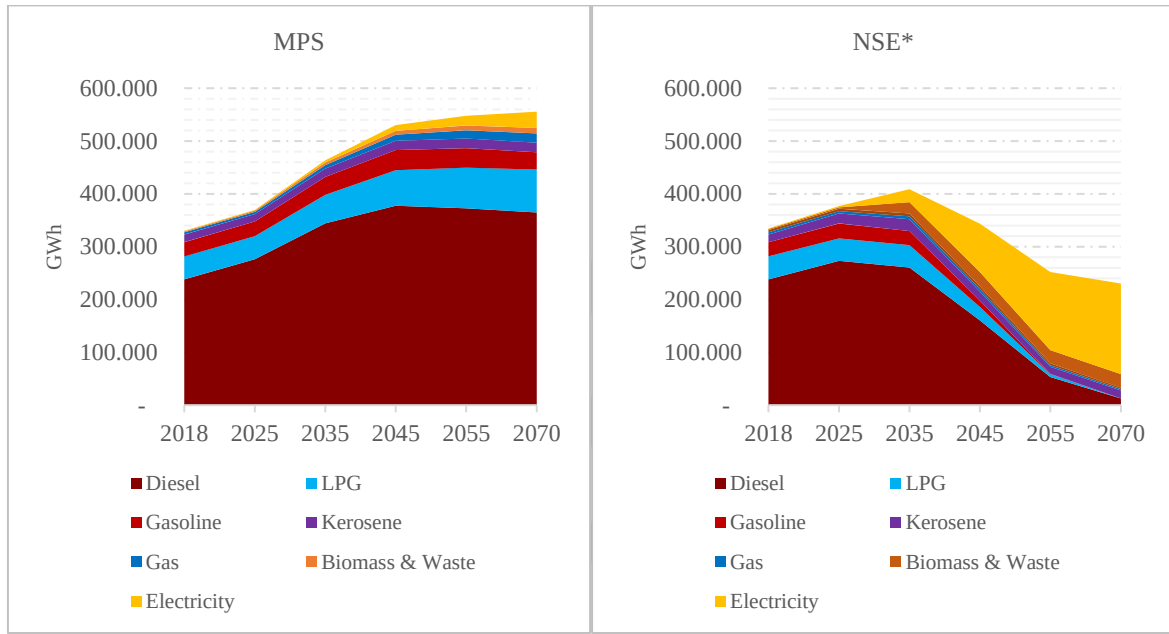
Şekil 6.9. Senaryolara göre yük taşımacılığı araç modları nihai enerji tüketimleri

Yakıt bazında senaryolar arası enerji tüketimi incelendiğinde, MPS'ler arasında elektrik tüketimi hariç anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Elektrik tüketimi için iki senaryo arasındaki farklılığın nedeni ulaşım tercihi değişimi kaynaklı MPS*'de demir yolu kullanımının payının artış göstermesidir. NSE senaryoları sonuçları analiz edildiğinde yakıt tüketimleri arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. MPS* ile NSE* senaryoları arasında ise elektrifikasyonun etkisiyle NSE* senaryosunda elektrik tüketimi toplam nihai enerji tüketiminin %60'ını oluşturmaktadır. Aynı senaryoda sıvı yakıtların oranı %95'den %28'e düşmekte, biyoyakıtların oranı ise özellikle hava yolu taşımacılığındaki SAF kullanımıyla %10'a çıkmaktadır (Şekil 6.10).



Şekil 6.10. Senaryolara göre nihai enerji tüketiminde yakıtların kullanım payları

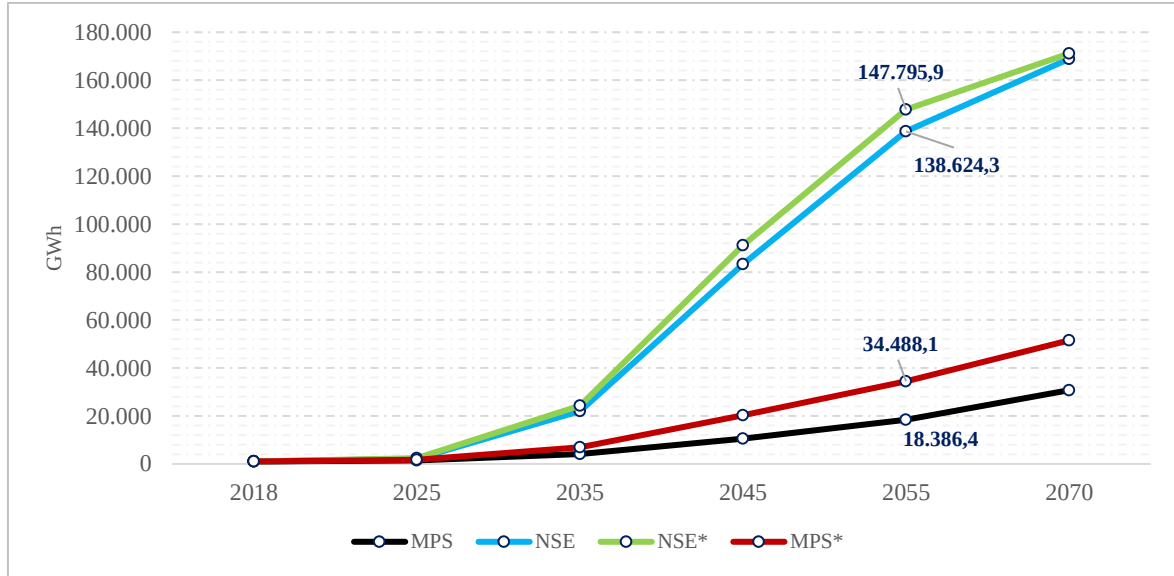
Bir havacılık yakıtı olarak tüketilen kerosen tahmin döneminde hem MPS hem de NSE*'de nihai enerji tüketiminde yaklaşık %4'lük bir paya sahiptir. Özellikle 2035'ten sonra, NSE*'de SAF karışımının önemli ölçüde artmaya başlamasıyla, SAF'ın nihai enerji tüketimindeki payı yaklaşık %0,1'den %8'e çıkmaktadır. Motorin tüketimi ise 2035 yılından sonra elektrifikasyonun hızlanmasıyla NSE* senaryosunda 100 TWh'in altına düşmekte, elektrik tüketimi ise 148 TWh'e çıkmaktadır (Şekil 6.11).



Şekil 6.11. Senaryolara göre nihai enerji tüketiminde yakıtların alt kırılımları

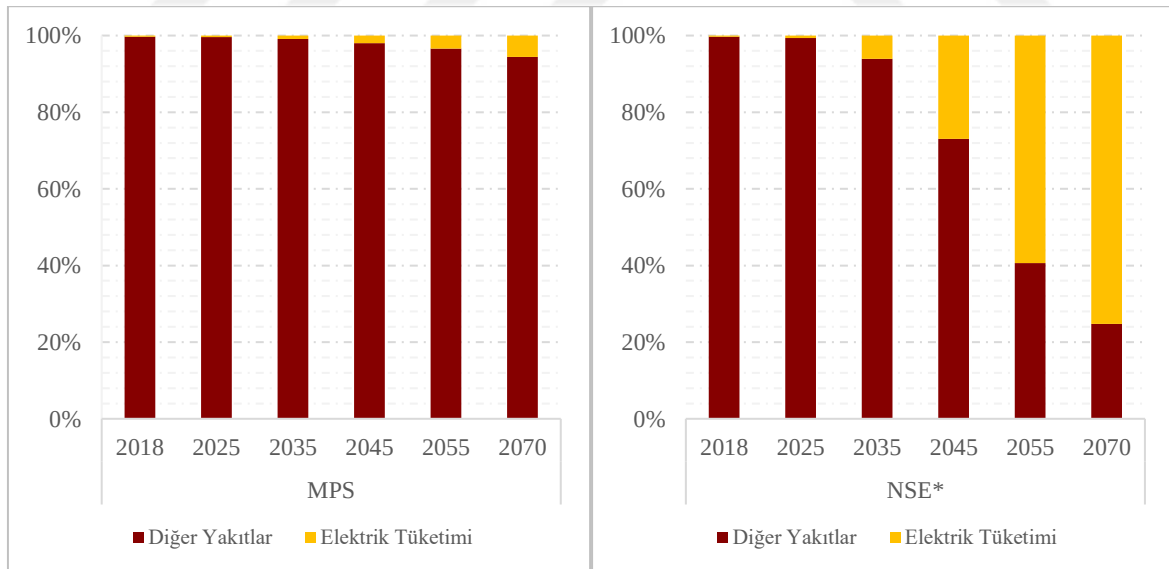
6.4. Elektrifikasyon Görünümü

2055 yılında baz yıl ulaşım tercihleri korunmuş MPS'de elektrik talebi 18,5 TWh iken ulaştırma tercihi değişmiş MPS*'de elektrik talebi 37,5 TWh'dir. Buna göre emisyon azaltımı politikaları olmadan ulaştırma tercihinin değişirmeye yönelik uygulanacak politikaların elektrik talebine getireceği ek yük yaklaşık 19 TWh'dir. Emisyon azaltımı politikalarının uygulandığı NSE senaryolarında ise baz yıl ulaşım tercihleri korunmuş NSE senaryosunda elektrik talebi 139 TWh iken ulaştırma tercihi değişmiş NSE* senaryosunda elektrik talebi 148 TWh'e çıkmaktadır (Şekil 6.12). Buna göre, net sıfır emisyon hedefleri kapsamında ulaştırma sektörü elektrik talebinin bugüne göre en az 139 kat artması öngörülmektedir. Bunun yanında MPS'ler ve NSE'ler arasında oluşan ve emisyon azaltım politikalarının etkisini gösteren ek elektrik talebi 110 TWh ile 120 TWh arasında değişmektedir.



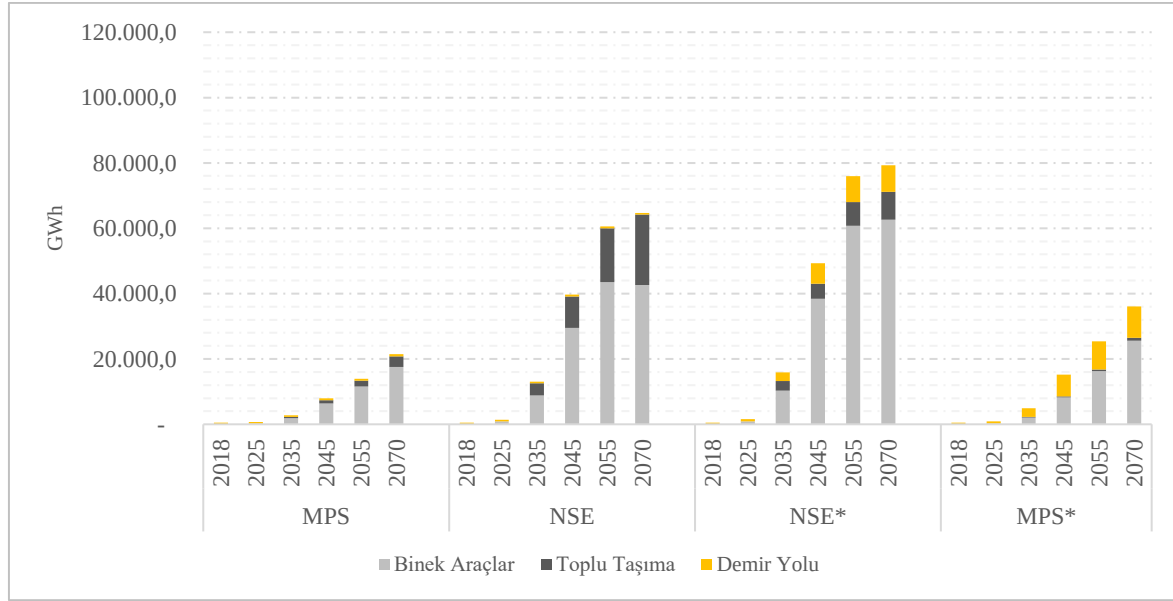
Şekil 6.12. Senaryolara Göre Ulaştırma Sektörü Elektrik Talebi

2055 yılında MPS’lerde nihai enerji talebinin sırasıyla yaklaşık %5’i ve %10’u elektrik enerjisinden karşılanmaktadır. NSE senaryolarında ise nihai enerji talebinin sırasıyla yaklaşık %55’i ve %60’ı elektrik enerjisinden karşılanmaktadır (Şekil 6.13).



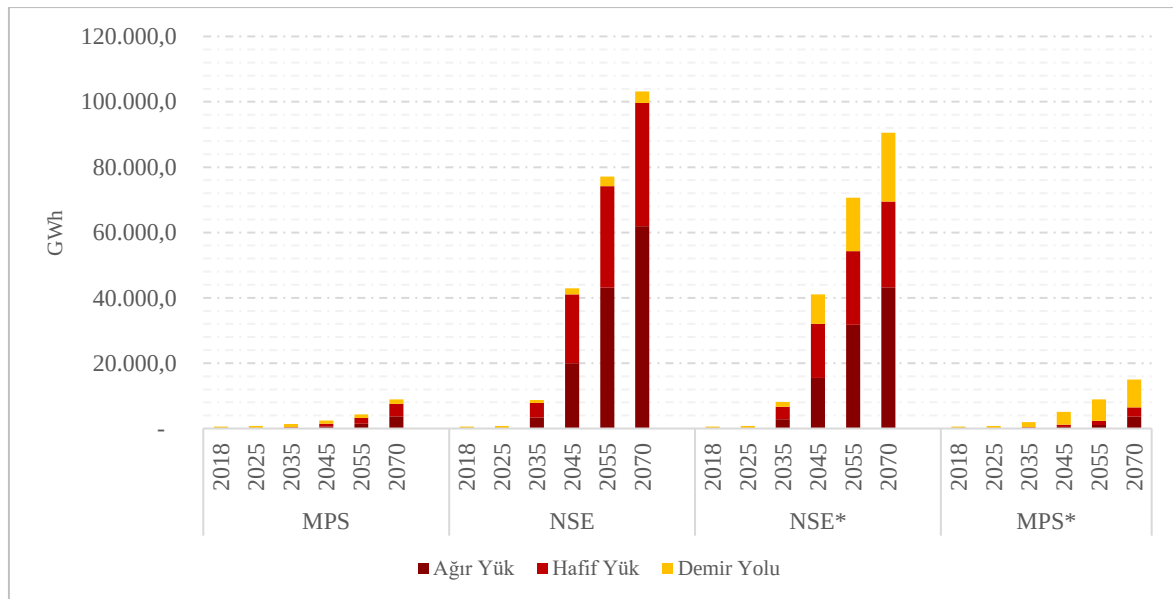
Şekil 6.13. Senaryolara göre elektrik tüketim payının gelişimi

Yolcu taşımacılığı araç modlarında elektrik tüketimi incelendiğinde MPS senaryoları arasında ulaştırma tercihi değişimi yüzünden binek araç ve demir yolu kaynaklı farklılıklar bulunmaktadır. NSE senaryolarında da görülmekte olan ulaştırma tercihi farklılıkları NSE* senaryosunda 2055 yılında yaklaşık 18 TWh ek elektrik tüketimi getirmektedir.



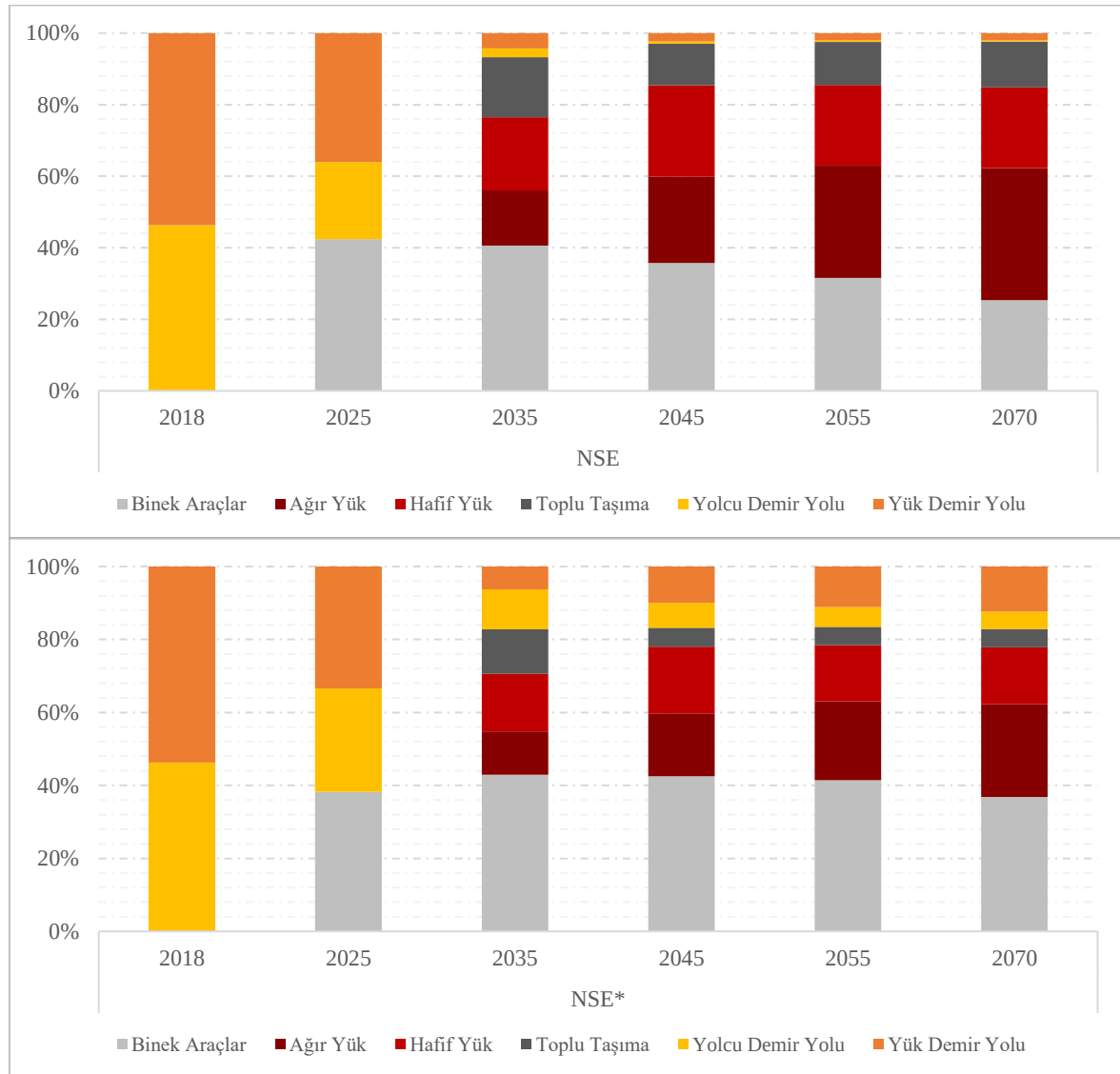
Şekil 6.14. Senaryolara göre yolcu taşımacılığı modlarında elektrifikasyon gelişimi

Yük taşımacılığı araç modlarında elektrik tüketimi incelendiğinde MPS senaryoları arasında ulaştırma tercihi değişimi yüzünden demir yolu kaynaklı farklılıklar bulunmaktadır. NSE senaryolarında da görülmekte olan ulaştırma tercihi yolcu taşımacılığından farklı olarak NSE* senaryosunda 2055 yılında yaklaşık 6,5 TWh daha az elektrik tüketimine neden olmaktadır. NSE* senaryosunda yük aktivitesi kara yolundan demir ve deniz yolu taşımacılığına kaydığı için demir yolu kaynaklı verimlilik artışı sebebiyle NSE* senaryosunda daha az elektrik tüketilmiştir (Şekil 6.15).



Şekil 6.15. Senaryolara göre yük taşımacılığı modlarında elektrifikasyon gelişimi

NSE senaryosunda elektrik tüketimi araç modları bazında incelendiğinde 2055 yılında ulaştırma sektöründe tüketilen elektriğin %32'si binek araçlar, %31'i ağır yük ticari hizmet araçları, %22'si hafif yük ticari hizmet araçları ve %12 toplu taşıma araçlarında tüketilmektedir. NSE* senaryosunda ise 2055 yılında ulaştırma sektöründe tüketilen elektriğin %42'si binek araçlar, %22'si ağır yük ticari hizmet araçları, %15'i hafif yük ticari hizmet araçları, %12'si yük trenlerinde tüketilmektedir (Şekil 6.16).



Şekil 6.16. Senaryolara göre elektrik tüketiminin araç modlarına göre oranı

6.4.1. Ulaştırma sektörü etkisi altında elektrik üretimi portföyü

Emisyon azaltımı politikalarının uygulandığı NSE senaryolarında baz yıl ulaşım tercihleri korunmuş NSE senaryosunda elektrik talebi 139 TWh iken ulaştırma tercihi değişmiş NSE*

senaryosunda elektrik talebi 148 TWh'e çıkmaktadır. Bu çalışmada kullanılan TUSEM'in temel aldığı TESH, diğer nihai enerji tüketimini oluşturan sektörler ile elektrik arzı ve ısı sektörleri için Türkiye Ulusal Enerji Planı'nda yer alan net sıfır emisyon hedefi kapsamında çalıştırılmıştır (ETKB, 2022a). Buna göre özellikle elektrik arzı olmak üzere bazı önemli sektörel varsayımlar şu şekildedir.

- Yakıt fiyatları
 - Uzun dönemli yakıt fiyat tahminleri için IEA'nın Dünya Enerji Görünümü (WEO) 2021 raporunda mevcut politikalar senaryosu için kullanılan fiyatlar baz alınmıştır. Ancak son yıllarda salgın hastalıklar, küresel krizler ve Rusya-Ukrayna savaşının etkisiyle enerji fiyatlarında yaşanan sert dalgalanmaların özellikle kısa ve orta vade de olmak üzere uzun dönemli fiyat projeksiyonlarını etkileyebileceği değerlendirilmiştir. Buna göre IEA varsayımları 2035 yılı sonrası için kullanılmıştır. 2025 yılına kadar olan daha yakın dönem için uluslararası vadeli işlemler piyasasında 2022 yılı Mayıs ayı itibarıyla işlem görmekte olan kontrat fiyatları kullanılmıştır. 2030 yılı için ise 2025 ve 2035 yılları için kabul edilen fiyatlar interpolate edilmiştir.
- Santral Ömürleri, Ortalama Emreamide Kapasite/Kapasite Faktörü ve Yatırım Maliyetleri
 - Santral ilk yatırım maliyetleri için IEA'nın mevcut politikalar senaryosunda belirlemiş olduğu teknoloji bazlı maliyetler dikkate alınmıştır. IEA tarafından farklı ülke/bölgeler için maliyetler belirlenmekte olup Çin ve Avrupa Birliğinde geçerli olan maliyetlerin ortalaması modelde baz alınmıştır. Santral teknik ömürleri için IEA'nın Öngörülen Elektrik Üretim Maliyetleri 2020 yılı çalışması dikkate alınmıştır (IEA, 2021). Yenilenebilir enerji santrallerinde ortalama kapasite faktörü ve diğer santrallerde emreamide kapasite oranı için ülkemizde geçmiş dönemde gerçekleştirmeler, mevcut ve proje aşamasındaki santraller ve uzun dönemdeki beklentiler dikkate alınmıştır.
- Net Sıfır Emisyon Hedefi kapsamında 2055 yılında kaynak bazlı elektrik üretim oranları
 - Türkiye elektrik sisteminde mevcut durumda sahip olduğu ve önümüzdeki dönemde sahip olabileceği esneklik imkânları ve yenilenebilir enerji potansiyeli dikkate alınarak, rüzgâr ve güneş gibi kesintili yenilenebilir kaynakların toplam elektrik üretimi içindeki paylarının yükseltilmesi amaçlanmıştır. Buna göre 2055 yılında kaynak bazlı elektrik üretim oranları için bölüm 2.5.1'de gösterilen IEA tarafından öngörülen varsayımlar dikkate alınmıştır (IEA, 2021a; EXIST, 2022).

- Bu çalışmada da kullanılan toplam yutak alan kapasitesi (120 Mt CO₂) kapsamında uzun dönemli sektörel emisyon kırımları
- 2020 yılında toplam emisyonların yaklaşık %70'ini enerji kaynaklı emisyonlar oluşturmakta olup, elektrik ve ısı sektörü toplam emisyonların yaklaşık %30'unu oluşturmıştır. 2055 yılına kadar artan elektrifikasyonunda etkisiyle elektrik ve ısı sektörünün toplam emisyonlar içindeki payının enerji arz güvenliği ve sistem esnekliği kapsamında artabileceği değerlendirilmiştir. Buna göre net-sıfır emisyon hedefine ulaşabilmek için enerji sektörü kaynaklı emisyonların üst sınırı toplam yutak alan kapasitesinin %80'i alınarak 96 Mt CO₂, elektrik ve ısı sektörü kaynaklı emisyonların üst sınırı ise 41 Mt CO₂ olarak hedeflenmiştir. Nihai enerji tüketimini oluşturan sektörlerin emisyonlarının ise üst sınırı 55 Mt CO₂ olarak öngörülmüştür.

TESM'de bu çalışmada kullanılan OECD büyüme oranı (%3,1) kullanıldığında net sıfır emisyon hedefi kapsamında ulaştırma sektörünün yanında diğer sektörlerin nihai elektrik tüketimi, kaynak bazlı elektrik üretim portföyü ve CO₂ emisyonu görünümü Çizelge 6.6'da yer almaktadır. Ayrıca Çizelge 6.6'da ulaştırma sektörü için tasarlanan NSE* senaryosu politikaları olmadığında ortaya çıkan enerji sektörü görünümü de yer almaktadır. Buna göre ulaştırma sektörü bazında ortaya çıkacak elektrifikasyonun elektrik arzına getireceği ek yatırım maliyeti de Çizelge 6.7'de değerlendirilmiştir.

Çizelge 6.6'ya göre ulaştırma sektörünün net sıfır emisyon hedefine katkısı 2055 yılında CO₂ emisyonu bazında yaklaşık 76 Mt CO₂ azaltımıdır. Bunun için nihai elektrik tüketiminde 82 TWh, brüt elektrik üretiminde ise 106 TWh ek elektrik talebi meydana gelmektedir. Bu talebi karşılayabilmek için Çizelge 6.7'ye göre 33,5 GW ek kurulu güç kapasitesi oluşmaktadır. Bu kapasitenin 28,5 GW'ını yenilenebilir, 4,3 GW'ını nükleer, 1,8 GW'ını fosil yakıtlı santraller oluşturmaktadır. Power to X santrallerinde ise 1,5 GW'lık daha az kapasiteye ihtiyaç duyulmaktadır. Buna göre ortaya çıkan ek kapasite ile beraber ulaştırma sektörünün net sıfır emisyon hedefinin elektrik üretim portföyüne getireceği ek maliyet yaklaşık 34 milyar \$ olarak öngörülmektedir.

Çizelge 6.6. NSE* senaryosu bazında ulaştırma sektörü elektrik talebinin elektrik arzında yarattığı görünüm

Ulaştırma Sektörü hariç NSE Politikalarına Göre Elektrik Üretim Portföyü ve CO ₂ Emisyonları										Ulaştırma Sektörü Dahil NSE Politikalarına Göre Elektrik Üretim Portföyü ve CO ₂ Emisyonları									
Enerji Tabanlı Toplam CO ₂ Emisyonları (Kt CO ₂)										Enerji Tabanlı Toplam CO ₂ Emisyonları (Kt CO ₂)									
2070	2055	2045	2035	2025	2018					2070	2055	2045	2035	2025	2018				
164.771	172.279	276.632	372.613	429.23	379.06	Toplam				76.112	96.613	235.79	367.20	428.18	379.05	Toplam			
131.860	131.449	183.183	237.940	231.40	96.802	Talep Tarafı				48.025	55.613	131.90	221.87	230.26	196.80	Talep Tarafı			
39.794	35.905	75.592	130.524	136.29	13.488	Sanayi, Konut, Tarım ve Hizmetler				39.904	36.041	75.663	130.42	136.29	113.48	Sanayi, Konut, Tarım ve Hizmetler			
92.066	95.544	107.591	107.416	95.113	83.314	Ulaştırma				8.122	19.572	56.239	91.447	93.973	83.314	Ulaştırma			
32.911	40.829	93.449	134.674	197.82	82.257	Arz Tarafı				28.087	41.000	103.89	145.32	197.91	182.25	Arz Tarafı			
27.640	34.788	71.817	89.652	142.70	36.134	Elektrik Üretim Santralleri				22.744	34.806	82.020	100.34	142.81	136.13	Elektrik Üretim Santralleri			
4.321	5.148	18.518	37.075	42.882	6.959	Sanayi Santralleri				4.385	5.290	18.757	37.041	42.857	36.959	Sanayi Santralleri			
949	893	3.114	7.947	12.238	9.164	Diğer				957	904	3.118	7.939	12.238	9.164	Diğer			
2.927	3.807	94				CCS Tarafından Tutulan CO ₂				2.233	3.288	301				CCS Tarafından Tutulan CO ₂			
Nihai Elektrik Tüketimi (GWh)										Nihai Elektrik Tüketimi (GWh)									
747.123	630.489	502.733	384.973	328.35	58.279	Toplam				837.939	712.370	553.76	394.41	328.55	258.27	Toplam			
664.965	563.195	459.877	365.578	321.34	54.329	Sanayi, Konut, Tarım ve Hizmetler				666.147	563.978	459.49	365.69	321.31	254.32	Sanayi, Konut, Tarım ve Hizmetler			
81.610	66.795	39.878	15.129	2.348	1.191	Ulaştırma				171.243	147.895	91.319	24.445	2.575	1.191	Ulaştırma			
548	499	2.977	4.266	4.661	2.759	Diğer				550	497	2.951	4.268	4.657	2.759	Diğer			
Brüt Elektrik Üretimi (GWh)										Brüt Elektrik Üretimi (GWh)									
1.201.19	975.806	706.435	462.128	382.04	305.04	Toplam				1.317.86	1.082.08	763.53	474.50	382.29	305.05	Toplam			
146.024	122.999	113.774	55.800	18.600		Nükleer				186.873	156.324	133.30	55.800	18.600		Nükleer			
866.226	702.782	435.541	250.105	148.45	87.703	Yenilenebilir				943.578	760.964	452.46	250.10	148.45	87.703	Yenilenebilir			
87.880	87.880	87.880	87.880	81.907	59.949	Hidroelektrik				87.880	87.880	87.880	87.880	81.907	59.949	Hidroelektrik			
357.192	310.013	187.706	90.130	38.257	19.953	Rüzgar				392.975	336.980	196.66	90.130	38.257	19.953	Rüzgar			
421.153	304.888	159.954	72.094	28.296	7.801	Güneş				462.722	336.104	167.91	72.094	28.296	7.801	Güneş			
131.099	125.143	152.017	154.434	214.70	217.34	Yakma Santralleri				111.527	122.846	172.61	166.80	214.96	217.34	Yakma Santralleri			
	16.786	60.276	67.612	72.383	65.789	Taş Kömürü					16.590	60.986	72.615	72.540	65.789	Taş Kömürü			
301	1.214	2.867	20.578	51.805	44.657	Linyit				351	1.439	7.512	24.854	51.883	44.661	Linyit			
		281	844	931	1.000	Sanayi CHP (Kömür)						281	838	931	1.000	Sanayi CHP (Kömür)			
76.670	59.586	60.747	38.776	61.224	83.596	Doğal Gaz				57.487	57.856	74.555	42.753	61.137	83.593	Doğal Gaz			
10.979	14.275	337				Doğal Gaz (CCS)				8.373	12.329	1.075				Doğal Gaz (CCS)			
3.508	196	26	1.423	409	224	Çevrim ve Gaz Türbini				5.760	1.190	48	299	409	224	Çevrim ve Gaz Türbini			
5.621	4.930	5.094	9.675	11.565	11.041	Sanayi CHP (Petrolgaz)				5.662	4.945	5.170	9.906	11.637	11.041	Sanayi CHP (Petrolgaz)			
15.463	11.158	5.590	1.182	4.718	2.568	Biyokütle				15.337	11.483	6.169	1.218	4.718	2.568	Biyokütle			
4.765	3.206	2.965	490	1.294	1.038	Sanayi CHP (Bivo)				4.765	3.221	2.979	473	1.331	1.038	Sanayi CHP (Bivo)			
13.792	13.792	13.836	13.853	10.375	7.432	Jeotermal				13.792	13.792	13.836	13.853	10.375	7.432	Jeotermal			
57.844	24.882	5.103	1.790	277		Depolama				75.891	41.953	5.164	1.790	277		Depolama			

Çizelge 6.7. NSE* senaryosu bazında ulaştırma sektörü elektrik talebinin elektrik arzına getirdiği ek maliyet

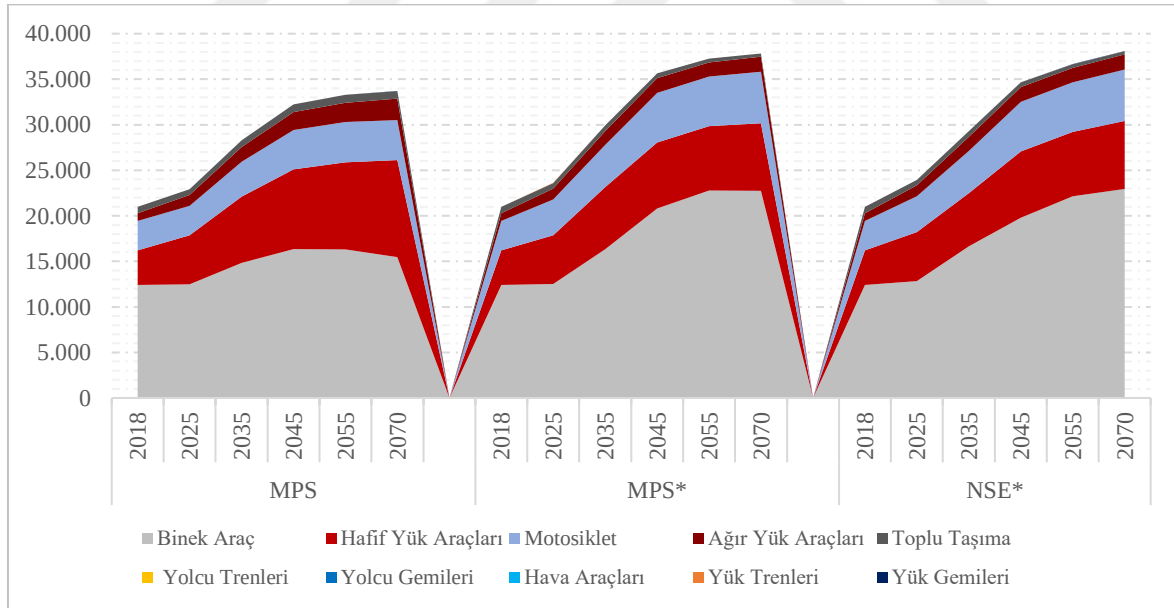
Ulaştırma Sektörü hariç NSE Politikalarına Göre Kurulu Güç ve Yatırım Maliyetleri						Ulaştırma Sektörü Dahil NSE* Senaryosuna Göre Kurulu Güç ve Yatırım Maliyetleri					
Kurulu Güç (GW)						Kurulu Güç (GW)					
2070	2055	2045	2035	2025	2018	2070	2055	2045	2035	2025	2018
595	489,6	309,5	183	118,3	89,8	647,6	523,1	319	183,1	118,4	89,8
18,9	15,9	15,2	7,2	2,4		24,2	20,2	17,2	7,2	2,4	-
418,4	328,7	196,7	110,2	64,1	40,4	456,3	357,3	204,7	110,2	64,1	40,4
35,1	35,1	35,1	35,1	33	28,3	35,1	35,1	35,1	35,1	33	28,3
118,9	102,1	61,1	29,6	13,1	7	130,6	111,1	64,1	29,6	13,1	7
264,4	191,4	100,4	45,4	17,9	5,1	290,5	211	105,4	45,4	17,9	5,1
42,5	39,9	45,4	54	51,6	49,4	47	41,8	45	54,1	51,7	49,4
-	6,8	9,9	10,4	10,4	9,1	-	6,8	9,9	10,4	10,4	9,1
0,7	2,8	8,9	11	10,2	9,8	0,7	2,8	8,9	11	10,2	9,8
-	-	0,1	0,4	0,4	0,4	-	-	0,1	0,4	0,4	0,4
18,6	12,3	16,4	22,8	21,7	21,9	15,3	12,7	16,8	22,8	21,7	21,9
3,3	3,3	1,1				3,3	3,3	1,1	-	-	-
9,8	6,5	1	0,9	1,2	3,2	18	7,9	0,2	1	1,3	3,2
2,9	2,1	2,3	3,5	3,2	2,7	2,4	2,1	2,3	3,5	3,2	2,7
3,3	2,5	2,2	2,3	2,3	0,8	3,3	2,6	2,2	2,3	2,3	0,8
1,5	1,1	1,1	0,4	0,3	0,2	1,5	1,1	1,1	0,4	0,3	0,2
2,4	2,4	2,4	2,4	1,8	1,3	2,4	2,4	2,4	2,4	1,8	1,3
62,6	60,1	26,7	7,1	0,3		63,7	60,1	26,7	7,1	0,3	-
52,6	45,1	25,6	4,5			56,5	43,7	25,4	4,5	-	-
Yatırım Maliyetleri (Milyon \$)						Yatırım Maliyetleri (Milyon \$)					
2070	2055	2045	2035	2025	2018*	2070	2055	2045	2035	2025	2018*
56.427	62.050	59.216	33.061	61.455		60.994	69.789	64.073	33.061	27.719	
2025-2070	2025-2055	Dönem Toplamı				2025-2070	2025-2055	Dönem Toplamı			
450.297	309.831					495.048	344.262				
						44.751	34.431	Sektördeki NSE* Politikalarının Elektrik Sektörüne Getireceği Ek Maliyet			

*Ara yıllara ait maliyetler çizelgede gösterilmemektedir. Dönem Toplamlarına bu maliyetlerde dahildir.

6.5. Araç Türü ve Motor Teknolojisine Göre Stok Gelişimi

Model sonuçlarına göre araç stokları incelendiğinde NSE* senaryosunda 2055 yılında araç stoğu 2018 yılına göre yaklaşık olarak %75 artmakta ve 37 milyon seviyelerine ulaşmaktadır (Şekil 6.17). Buna göre NSE* senaryosunda baz yıl ulaşım tercihleri korunmuş MPS senaryosuna göre 2055 yılında yaklaşık 4 milyon ek araç talebi ortaya çıkmaktadır. 2018 yılında 12,4 milyon olan binek araç sayısı 2055 yılında 22,2 milyon seviyesine ulaşarak araç stoğu gelişimine önemli bir katkı sunmaktadır.

Artan binek araç sayısı ile 2018 yılında her bin kişiye 151 binek araç düşerken 2055 yılında her bin kişiye 210 binek araç düşmektedir. Araç stoğu bazında ise her bin kişiye 255 araç düşerken 2055 yılında her bin kişiye 351 araç düşmektedir. NSE* senaryosunda araç stoğuna ikinci büyük katkırı veren hafif yük ticari hizmet araçları stoğu 2018 yılında 3,8 milyondan 2055 yılında %85 artarak 7,1 milyona çıkmaktadır. Aynı dönemde motosikletler 3,2 milyondan 5,4 milyona, ağır yük ticari hizmet araçları 845 binden 1,5 milyona çıkmaktadır.

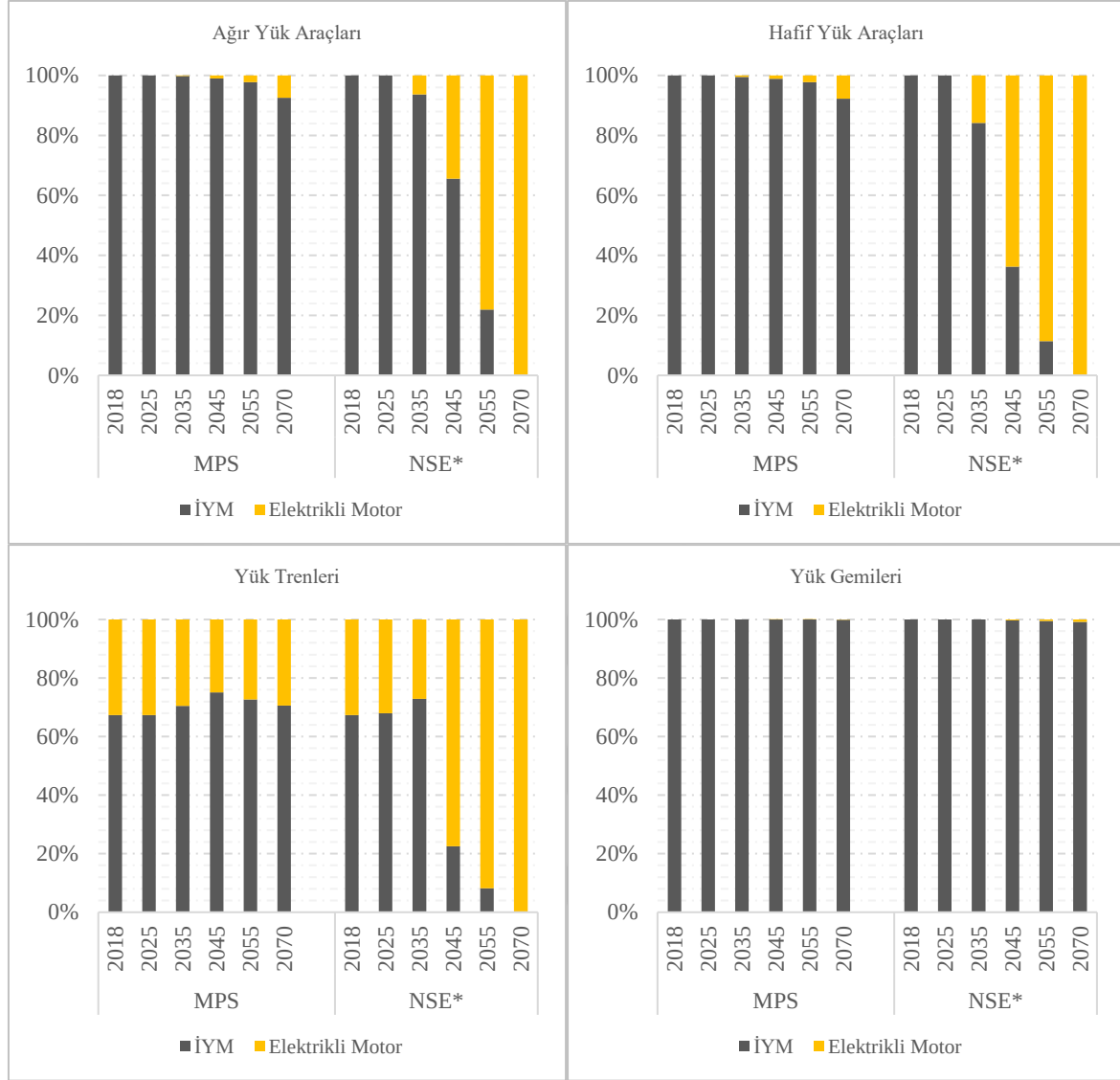


Şekil 6.17. Araç türüne göre stok gelişimi

Motor teknolojilerine göre araç stoğu gelişimi her bir araç türü bazında Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'de gösterilmektedir.



Şekil 6.18. Yolcu taşımacılığında teknoloji türüne göre araç stoku gelişimi



Şekil 6.19. Yük taşımacılığında teknoloji türüne göre araç stoku gelişimi

Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'ye göre NSE* senaryosu kapsamında 2055 yılında binek araç ve yolcu treni stoku tamamen elektrikli olmaktadır. Aynı dönemde motosiklet stokunun %91'i, yük treni stokunun %91'i, hafif yük ticari hizmet araç stokunun %88'i, ağır yük ticari hizmet araç stoku %79'u, toplu taşıma araç stokunun ise %67,8'i elektrikli olmaktadır.

6.6. Model Sonuçlarının Diğer Çalışmalar ile Karşılaştırılması

6.6.1. Nihai enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları

Çalışmada kullanılan TUSEM, AB'deki birçok ülke tarafından enerji modellemesinde kullanılan PRIMES enerji modeli altyapısını kullanmaktadır. Buna göre, önerilen

yaklaşımın etkinliğini doğrulamak için PRIMES modeline atıfta bulunan çalışmaların sonuçlarını karşılaştırmak önem arz etmektedir. Bu doğrultuda bu çalışma sonuçları Avrupa Komisyonu'nun enerji, ulaşım ve iklim eylemi alanlarındaki ana analiz araçlarından biri olan ve 2020 yılında yürürlükte olan politika çerçevesi temel alınarak hazırlanan AB Referans Senaryosu 2020 sonuçları ile karşılaştırılmıştır (EC, 2020b). Bu sonuçlara göre, 2050-2055 yıllarında bazı gelişmiş AB ülkelerinin ulaştırmaya dayalı nihai enerji tüketimi ve toplam emisyonlarındaki değişimin Türkiye sonuçları ile karşılaştırılması Çizelge 6.8'de verilmektedir. Buna göre hem nihai enerji tüketimi hem de bazı AB ülkelerinin emisyonları 2020-2025 yıllarında, Türkiye için ise 2030'larda en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Türkiye için bu durum NDC'de rapor edilen emisyonların 2030'larda zirve yapacağı taahhüdüne benzer niteliktedir (ÇŞİDB, 2022b). Buna göre, ilgili ülkelerin ve Türkiye'nin nihai enerji tüketimlerinin ve toplam emisyonlarının en yüksek seviyeye ulaşacağı yıl ile 2055 yılı arasındaki değişim sonuçları karşılaştırıldığında, nihai enerji tüketimi değişimleri açısından Türkiye, ilgili ülkelerle benzerlikler göstermektedir. Ancak CO₂ emisyonlarındaki değişikliklerden dolayı Türkiye'nin azaltım büyüklüğü açısından ilgili ülkelere farklılaştığı görülmektedir. Bu farklılığın nedeni, bu çalışmada kullanılan ve Çizelge 5.4'te 2035 yılından itibaren içten yanmalı motor teknolojilerine yeni girişin kısıtlanmasına ilişkin politikanın AB Referans Senaryosunun varsayımları arasında yer almamasıdır. Bunun elektrikli araçlardan oluşacak emisyon azaltım miktarını etkilediği değerlendirilmiştir. Hâlihazırda pek çok AB ülkesinin söz konusu kısıtlamayı uygulayacağı dikkate alındığında, bu kısıtlamanın ilgili senaryoya eklenmesiyle birlikte 2050 yılında AB'de ulaşımdan kaynaklanan emisyonların önemli ölçüde azalacağı öngörülmektedir.

Çizelge 6.8. Ulaştırma kaynaklı nihai enerji tüketimi ve emisyonların karşılaştırılması

	Ülkeler	2020	2025	2035	2045	2050	2055	Üst Değer ile 2050-2055 Değişimi (%)
Nihai Enerji Tüketimi (TWh)	AB	2.667	2.968	2.534	2.255	2.208		25,6%
	Almanya	554	540	436	379	374		33,3%
	İspanya	258	323	277	253	259		19,8%
	Fransa	393	464	379	335	325		30,0%
	İtalya	317	396	336	283	272		31,3%
	Türkiye	309	370	401	337	288	249	38,4%
CO ₂ Emisyonları (Mt)	EU	638	698	548	452	431		38,4%
	Almanya	132	128	92	74	72		47,5%
	İspanya	63	77	61.5	53	53		31,0%
	Fransa	93	108	81	65	60		44,4%
	İtalya	77	92	70	51	47		48,9%
	Türkiye	78	93*	91*	56	36	19	80,0%

*Türkiye ulaştırma kaynaklı CO₂ emisyonu 2030 yılı tahmini 96 Mt olduğu için 2025 ve 2030 yılları koyulaştırılmıştır

6.6.2. Yatırım maliyetleri

Mevcut politikalar senaryosunda, 2025-2055 döneminde net sıfır emisyon politikaları olmadığında 1,9 trilyon \$ olan yatırım harcamaları, net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için uygulanan politikalarla birlikte baz etkisinin korunduğu NSE senaryosunda 2,05 trilyon \$'a, ulaşım tercihlerinin değiştiği NSE* senaryosunda ise 2,3 trilyon \$'a yükselmektedir (Çizelge 6.9).

Çizelge 6.9. Senaryolara göre ulaştırma sektörü yatırım harcamaları (2025-2055)

Milyar \$	MPS	NSE*	İlave	Yıllık İlave	Kişi Başı Toplam Ek Maliyet (\$)
Toplam	1.909,2	2.315,3	406,1	13,5	127,5
Yolcu	1.179,1	1.590,5	411,4	13,7	
Hava Yolu	118,9	285,8	166,9	5,6	
Deniz Yolu	3,9	4,0	0,1	0,0	
Özel Kara Yolu	673,0	966,9	293,9	9,8	
Toplu Taşıma	371,9	225,1	- 146,8	- 4,9	
Demir Yolu	11,4	108,7	97,3	3,2	
Yük	730,1	724,8	- 5,3	- 0,2	
Deniz Yolu	50,0	77,8	27,8	0,9	
Demir Yolu	16,4	99,6	83,2	2,8	
Kara Yolu	663,7	547,5	- 116,2	- 3,9	
Milyar \$	NSE	NSE*	İlave	Yıllık İlave	Kişi Başı Toplam Ek Maliyet (\$)
Toplam	2.047,1	2.315,3	268,2	8,9	84,2
Yolcu	1.278,7	1.590,5	311,8	10,4	
Hava Yolu	126,7	285,8	159,2	5,3	
Deniz Yolu	4,0	4,0	0,0	0,0	
Özel Kara Yolu	747,6	966,9	219,3	7,3	
Toplu Taşıma	390,8	225,1	- 165,7	- 5,5	
Demir Yolu	9,7	108,7	98,9	3,3	
Yük	768,3	724,8	- 43,5	- 1,5	
Deniz Yolu	51,9	77,8	25,9	0,9	
Demir Yolu	20,6	99,6	79,0	2,6	
Kara Yolu	695,9	547,5	- 148,4	- 4,9	
Milyar \$	MPS	NSE	İlave	Yıllık İlave	Kişi Başı Toplam Ek Maliyet (\$)
Toplam	1.909,2	2.047,1	137,9	4,6	43,3
Yolcu	1.179,1	1.278,7	99,6	3,3	
Hava Yolu	118,9	126,7	7,8	0,3	
Deniz Yolu	3,9	4,0	0,1	0,0	
Özel Kara Yolu	673,0	747,6	74,5	2,5	
Toplu Taşıma	371,9	390,8	18,9	0,6	
Demir Yolu	11,4	9,7	- 1,7	- 0,1	
Yük	730,1	768,3	38,3	1,3	
Deniz Yolu	50,0	51,9	1,9	0,1	
Demir Yolu	16,4	20,6	4,2	0,1	
Kara Yolu	663,7	695,9	32,2	1,1	
Milyar \$	MPS*	NSE*	İlave	Yıllık İlave	Kişi Başı Toplam Ek Maliyet (\$)
Toplam	2.190,1	2.315,3	125,2	4,2	39,3
Yolcu	1.507,5	1.590,5	83,0	2,8	
Hava Yolu	279,9	285,8	5,9	0,2	
Deniz Yolu	3,9	4,0	0,1	0,0	
Özel Kara Yolu	872,5	966,9	94,4	3,1	
Toplu Taşıma	213,7	225,1	11,4	0,4	
Demir Yolu	137,5	108,7	- 28,8	- 1,0	
Yük	682,6	724,8	42,2	1,4	
Deniz Yolu	74,8	77,8	3,0	0,1	
Demir Yolu	81,8	99,6	17,8	0,6	
Kara Yolu	526,0	547,5	21,5	0,7	

Bu durum yılda sırasıyla 4,6 ve 13,5 milyar \$'lık ek yatırım ihtiyacı yaratmaktadır. Önümüzdeki 30 yıl için Türk vatandaşı başına ödenecek yıllık ilave maliyet ise NSE* senaryosunda yaklaşık 127 \$/yıl olmaktadır. Bu maliyet, AB için yapılan çalışmadaki maliyetlere benzemektedir (AB vatandaşı başına 100 €) (Siskos ve diğerleri, 2018). NSE*de yolcu taşımacılığında yıllık ortalama ek yatırım ihtiyacı 13,7 milyar \$'dır ve yük taşımacılığında için karayolu taşımacılığına yönelik yıllık ek harcama yoktur. Ancak, yük taşımacılığında karayolundan demiryoluna ve denizyoluna geçiş olduğu için, NZES bu iki mod için sırasıyla yıllık 2,8 milyar \$ ve 0,9 milyar \$ ek yatırım gerekeceği öngörülmektedir (Çizelge 6.9).

Hollanda bankası ING'ye göre Çin'in ve Japonya'nın net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için ulaştırma sektöründe yaklaşık 12 trilyon \$ harcayacakları öngörülmektedir (CNBC, 2021). Bu ülkelerin hem toplam CO₂ emisyonlarının hem de ulaştırma sektörü emisyonlarının Türkiye'nin yaklaşık 2,5-3 katı olması, model sonuçlarının bu yönde de anlamlı olduğuna işaret etmektedir (UNFCCC, 2022b; World Bank. 2022c).

6.7. Duyarlılık Analizi

Geliştirilen modelde, bölüm 5.2'de elde edilen yolcu ve ton km aktiviteleri model sonuçlarına doğrudan etki etmektedir. Bu faaliyetleri elde etmek için kullanılan GSYH, faaliyet tahminleri için en önemli girdidir. Buna göre model sonuçlarının GSYH değişimlerine karşı duyarlılığının gösterilmesi model sonuçlarına göre belirlenebilecek politikaların etkinliği açısından önemlidir. Bu çalışmada, GSYH büyümesi için OECD verilerine göre bileşik yıllık büyüme oranı %3,1 alınmıştır. Bu oran, Türkiye'nin 2000-2020 yılları arası yıllık bileşik büyüme oranı olan %4,5 olarak alındığında, ortaya çıkan nihai enerji tüketimi ve CO₂ emisyon sonuçları senaryolar bazında Çizelge 6.10'da gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre yıllık gerçekleşebilecek %1,4'lük ek büyümenin hem nihai enerji tüketimi hem de CO₂ emisyonları bazında 2055 yılı için %19'luk bir artışa neden olacağı görülmektedir.

Öte yandan mod değişikliklerinin etkisinin görülmesi de ulaştırma sektörü politikaları açısından önemli olan bir diğer husustur. Buna göre NSE* senaryosunda uygulanan ulaşım tercihleri değişimi yapılmadan baz yıl ulaşım tercihlerinin 2055 yılına kadar aynı tutulması sonucunda ortaya çıkacak sonuçlar önceki bölümlerde NSE senaryosu sonuçları altında verilmiş olup bu bölümde Çizelge 6.10'da gösterilmektedir. Buna göre ulaşım tercihleri

değişimi nihai enerji tüketiminde NSE* senaryosunda yaklaşık %7 daha fazla enerji tüketimine neden olurken enerji yoğun modlarda artan elektrifikasyon nedeniyle CO₂ emisyonlarında yaklaşık %6 daha az emisyonu neden olmaktadır.

Çizelge 6.10. Senaryolara göre duyarlılık analizi sonuçları

		Senaryolar	2025	2035	2045	2055	2070
Senaryo Sonuçları	Nihai Enerji Tüketimi (TWh)	MPS*_4,5	375,1	496,6	595,3	641,0	704,1
		MPS*_3,1	373,0	469,7	530,9	537,8	538,2
		NSE*_4,5	372,4	421,6	374,7	296,4	295,9
		NSE*_3,1	370,4	401,5	337,9	249,1	227,5
		NSE_3,1	365,3	392,8	327,0	231,7	191,3
	CO ₂ Emisyonu (Mt)	MPS*_4,5	94,7	123,3	142,8	148,5	157,6
		MPS*_3,1	94,2	116,7	127,5	124,7	120,1
		NSE*_4,5	93,8	95,0	61,0	22,9	10,3
		NSE*_3,1	93,3	90,8	55,8	19,4	7,9
		NSE_3,1	92,7	90,3	57,5	20,6	3,9
Senaryoların Değişim Oranı (%)	Nihai Enerji Tüketimi (TWh)	MPS*	0,6%	5,7%	12,1%	19,2%	30,8%
		NSE*	0,6%	5,0%	10,9%	19,0%	30,1%
	CO ₂ Emisyonu (Mt)	MPS*	0,6%	5,6%	12,0%	19,1%	31,3%
		NSE*	0,5%	4,6%	9,3%	18,1%	30,1%

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

21. Yüzyıl, Dördüncü ve Beşinci Sanayi Devrimlerinin yaşandığı, birçok teknolojinin akıllı ve yapay zekâ sistemleri ile donatıldığı ve Dünya'nın bugüne kadar yaşanmış tüm gerçeklerini, insan zekâsının almakta zorluk yaşayabileceği bir hızla değiştiren uygulamaların görüldüğü bir çağ olarak yerini almaktadır. Belki de bu çağın en önemli girdisini oluşturan enerji sektöründeki gelişmeler, bu çağla eşgüdümlü hareket etmenin zorlu ve meşakkatli olacağını göstermesi açısından oldukça önemlidir.

Enerji sektöründe tüm kuralların yeniden yazıldığı bir dönemden geçilmektedir. Enerji bağlamında, enerji ihracı yapan ülkeler önemlerini yitirmekte hatta ithalatçı konumuna düşmekte; enerji ithalatı yapan ülkeler ise talep artışının merkezi olmakta ve jeopolitik konumlarına göre enerji transferi için koridor haline gelmektedirler. Buna en iyi örnek ülke olan Türkiye, OECD ülkeleri içerisinde geçtiğimiz dönemde enerji talep artışının en hızlı gerçekleştiği ülke konumuna gelmiş; Dünyada 2000'li yıllardan bu yana elektrik ve doğal gazda Çin'den sonra en fazla talep artış hızına sahip ikinci ülke olmuştur. Bu özelliğini gelecek yıllarda da sürdürmeye devam edeceği öngörülen Türkiye, enerjinin önemli geçiş merkezlerinden biri olma yolunda da hızla ilerlemektedir. Önümüzdeki yıllarda petrol ve doğal gaz boru hatları projeleriyle ve enerji alt sektörlerinin piyasa merkezi olma hedefleriyle Türkiye, bu hedefleri sonuca willandıracak sosyoekonomik gelişmişlik, siyasi ve teknolojik altyapısını üst seviyeye çıkarmak zorundadır.

Ülkelerin kullandıkları enerji kaynakları ithalat ve ihracat durumları hariç olmak üzere ilk bakışta çevre ve diğer ülkeleri etkilememekte ve ilgilendirmemektedir. Ancak son yıllarda sosyo/ekonomik ve siyasi belirsizlikler yüzünden Dünyada yaşanan gelişmeler, enerji kaynaklarını ve fiyatlarını doğrudan etkilemekte ve ayrıca bu kaynakların çevre ve dünya iklimini sera gazı emisyonları anlamında son derece olumsuz etkilemeleri nedeniyle coğrafi olarak birbirlerinden çok uzakta bulunan ve herhangi bir enerji kaynağı alışverişinde bulunmayan ülkeler arasında bile enerji kullanımıyla ilgili sorunların baş göstermesine yol açmaktadır. Bu doğrultuda 2020'den itibaren iklim değişikliği tehdidine karşı küresel sosyo/ekonomik dayanıklılığı güçlendirmeyi ve küresel sıcaklık artışını uzun vadede sanayileşme öncesi döneme kıyasla mümkün olduğunca 2°C'nin altında tutmayı amaçlayan "Paris İklim Anlaşmasını" onaylayan Türkiye, bildirmiş olduğu taahhütlerle beraber yenilenebilir enerji ve alternatif temiz enerji kaynaklarını enerji sistemine daha fazla entegre

etmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla beraber 2053 yılında net sıfır emisyon hedefini açıklayan Türkiye'nin ilerleyen zamanda bu hedef için nihai enerji tüketimini oluşturan sektörlere yönelik yol haritalarını açıklaması ve detaylandırması beklenmektedir.

İklim değişikliği en büyük çevresel, sosyal ve ekonomik tehditlerden birini teşkil etmekte olup sera gazı emisyonları bu değişikliğe neden olan en önemli etkenlerden biridir. Bu nedenle sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik politikalar ve stratejiler belirleyen birçok ülke 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedeflerini açıklamaktadır. “2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi” belirleyen Türkiye kapsamında, önemli bir nihai enerji tüketim ve CO₂ emisyon miktarına sahip olan ulaştırma sektörü emisyon azaltım politikalarında önemli bir konumda bulunmaktadır. Bu anlamda net sıfır emisyon hedefi kapsamında yapılan ilk akademik çalışmalardan biri olan bu çalışmada, emisyon azaltımına yönelik iddialı ulaştırma politikalarının ve stratejilerinin Türkiye’de de uygulanması durumunda bu uygulamaların “2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi” üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi amaçlanmıştır.

Net sıfır emisyon hedefini doğrudan ve en önemli şekilde etkileyen faktörlerden biri yutak alanları potansiyelidir. Bu çalışmada son 30 yıldaki trend gelişimi göz önüne alındığında, yutak alanların karbon tutma miktarının 2055 yılında yaklaşık olarak 120 Mt CO₂ seviyelerinde olacağı varsayılmıştır. Ayrıca, Türkiye'nin Birleşmiş Milletler ile paylaştığı 2018 Ortak Raporlama Formatı (CRF) tablolarında emisyon faktörlerinde ve emisyonların sektörel paylarının uzun dönemli seyrinde önemli derecede değişkenlik olmayacağı varsayılarak, net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için ulaştırma sektöründen kaynaklanan emisyonların üst sınırının yaklaşık olarak en fazla 25 Mt CO₂ olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Tüm bu varsayımlar altında net sıfır emisyon hedefi belirleyen birçok ülkede olduğu gibi Türkiye’de de yutak alanların kapasitesinin artırılmasına yönelik çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, karbon tutma potansiyeli bilinmeyen yutak alanların karbon tutma potansiyelinin belirlenmesi, AB Sürdürülebilir Karbon Döngüsü stratejisi doğrultusunda karbon sertifikasyonu ve diğer teşvik mekanizmalarının oluşturulması ve denizciliğin yutak kapasitelerinin artırılmasına yönelik politikaların benimsenmesi, politika yapıcılara net sıfır emisyon hedefine ulaşmada daha fazla esneklik sağlayacaktır.

Çalışmada uygulanan modelde SB düzeyindeki aktivite talebi (pkm-tkm) girdi olarak dışsal belirlenmektedir. Analiz sonucunda, pkm ve tkm verilerinin belirli bir ekonomik büyüme

seviyesinden sonra doygunluk noktasına yaklaşacağını varsayan lojistik eğri fonksiyonunun en iyi tahmin yöntemi olduğuna karar verilmiştir. İlgili doygunluk noktası, nüfus projeksiyonundaki büyüme hızının yavaşladığı ve durgunlaştığı yıllara denk gelmektedir. Ayrıca bu nokta gelişmiş ülkelerin kişi başına düşen km değerleri ile de paralellik göstermektedir. Buna göre çalışmada 2055 yılında Türkiye'nin pkm değerinin bugüne göre yaklaşık 1,5 kat, tkm değerinin ise yaklaşık 2,6 kat artacağı öngörülmüştür.

Bu çalışmada Türkiye'nin belirlediği 2053 net sıfır emisyon hedefi kapsamında ulaştırma sektörünün mevcut ve uygulanabilir politikalar çerçevesinde bu hedefe ulaşmak için nasıl konumlandırılabilceğini göstermeye çalışan bir sistem analizi sunulmaktadır. Türkiye Enerji Sistemi Modeli (TESM) tabanlı tasarlanan Türkiye Ulaştırma Sektörü Enerji Modeli (TUSEM) ile ulaştırma sektörü analiz edilmiş ve sonuçlar iki ana senaryo olmak üzere çeşitli alt senaryolar altında sunulmuştur. Mevcut Politikalar Senaryosu olan MPS, mevcut ulaştırma politikalarını ve gelecekteki politikalar için ölçülü göstergeleri sağlamaktadır. Net Sıfır Emisyon Senaryosu olan NSE ise Türkiye'nin net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için AB'de uygulanan (veya gelecekte uygulanacak) düşük karbonlu ve iddialı ulaştırma sektörü politikalarını değerlendirmektedir.

Senaryo sonuçları incelendiğinde MPS'lerin Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi kapsamında mevcut politikalar, mevcut teknoloji ve 2035 yılında toplam araç sayısının %15'i elektrikli araç olacak hedefine göre etkisiz senaryolar olduğu sonucuna varılmıştır. Buna göre baz yıl ulaşım tercihleri korunmuş ve ulaşım tercihleri değişmiş MPS sonuçları özelinde mevcutta toplam pkm'nin %54'ünü oluşturan kamu yolcu taşımacılığı, dekarbonizasyon için daha tercih edilebilir paya sahip olmasına rağmen, mevcut politikalar altında ek politikalar ve verimlilik önlemleri olmaksızın bu payın tek başına yeterli olmayacağı analiz edilmiştir. Ayrıca NSE* senaryolarında binek otomobillerde istenilen elektrifikasyonun sağlanamaması durumunda toplu taşımanın mevcuttakış pkm içindeki payının daha da yükseltilmesine yönelik uygulanacak ek politikaların net sıfır emisyon hedefi için önemli olacağı değerlendirilmektedir.

NSE senaryolarında, varsayılan yutak alan potansiyeli sonucunda net sıfır emisyon hedefi sağlansa da senaryolarda uygulanan politikaların zamanlamasının ilgili hedefe ulaşılması açısından kritik öneme sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Buna göre birçok AB ülkesinde uygulanan ve gelecekte uygulanacak olan EU6/EU7 emisyon standartlarının 2030 yılı

öncesinde Türkiye'de uygulanmaya başlanmasının net sıfır emisyon hedefi açısından önemi model sonuçlarıyla ortaya konulmuştur. Bunun yanında oluşturulan alternatif NSE senaryolarında emisyon standartları uygulamasının tek başına ilgili hedefe ulaşmada yeterli olmayacağı sonucuna varılmıştır. Bu bakımdan içten yanmalı motor teknolojilerine sahip yeni araçların ulaştırma sistemine entegrasyonunun araç türü bazında 2035 ve 2040 yıllarından itibaren kısıtlanması ve bu yıllara kadar 20 ve daha üstü yaşa sahip eski araçların ulaştırma sisteminden çıkarılmasının sağlanması, net sıfır emisyon hedefi açısından önemli politika uygulamaları olacaktır. Ayrıca kısıtlama yıllarının bugünden hızlı bir şekilde politika olarak benimsenmesi ve açıklanması, ulusal ve özellikle uluslararası teknoloji ve piyasa payı rekabetinde, iş stratejilerinin geliştirilmesi konusunda Türkiye'ye ve Türk girişimcilere önemli avantajlar getireceği değerlendirilmektedir. Genel olarak oluşturulacak emisyon azaltım politikaları için NSE_eu6 senaryolarının kısa vadeli hedeflerin etkinliği, NSE_ban senaryolarının ise orta ve uzun vadeli hedeflerin etkinliği için önemli politika girdileri sağlayacağı değerlendirilmektedir. Ancak daha uzun vadeli ülke hedeflerinde, söz konusu iki politikanın zamanlama olarak birbirine bağlı şekilde uygulanması yönünden tamamlayıcı özellikleri bulunmaktadır. Bunların yanında yük taşımacılığında karayolundan demir ve deniz yoluna geçişin sağlanamaması durumunda ulaştırma sektörünün net sıfır emisyon hedefinden sapabileceği de öngörülmektedir. Ancak demiryolu taşımacılığında fosil yakıt kullanımı önemli bir büyüklüğe sahip olduğu için demiryolu taşımacılığının payının artırılmasının bu moddaki emisyon azaltımı için gereken hızlı bir elektrifikasyonla beraber gerçekleşmesi önem arz etmektedir.

Havayolu taşımacılığının enerji talebinin arttığı MPS senaryolarında havayolu emisyonları da hızla artırmaktadır. Ancak NSE senaryolarında, SAF'ın kerosel ile artan karışımının, enerji talep artışından ayrılarak emisyon artışını sınırlayacağı görülmektedir. Buna göre havacılıktaki teknolojik gelişmelerin sağlayacağı verimlilik iyileştirmeleri ve özellikle uçakların taksi yapması sırasında elektrikli motorları kullanmalarının sağlanması emisyonların azaltılmasına katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Belirli mesafelerde havayolunda ve denizyolunda kullanılabilecek hidrojen, amonyak ve elektrik enerjisi gibi alternatif temiz yakıtlar, model sonuçlarını doğrudan etkileyebileceğinden bu çalışmanın dışında tutulmuştur. Bunun temel nedeni özellikle amonyak ve hidrojenin ülke içi modellemelerde maliyet etkinliğinin düşük olmasından kaynaklı uzun menzilli okyanus ötesi hareketlilik için daha uygun yakıtlar olmasıdır.

Gelecekte verimlilik ve teknoloji gelişimlerine paralel olarak özellikle ağır hizmet tipi kara taşımacılığı ile hava ve deniz taşımacılığında maliyet etkin bir şekilde politika ve uygulamalara konu olabilecek bu yakıtlarla emisyonlarda önemli azalmaların sağlanabileceği kaçınılmazdır. Bu anlamda gelecek çalışmalarda bu tezde geliştirilen model söz konusu alternatif yakıtların değerlendirilmesine imkân tanıma yeteneğine de sahiptir.

Tüm taşıma modlarında fosil kaynaklarla harmanlama imkanından dolayı önemli bir emisyon azaltımı sağlama potansiyeline sahip olan biyoyakıtlar bu çalışmada maliyet ve kaynak potansiyeli optimizasyonu nedeniyle belli oranlarda karayolu taşımacılığında geleneksel biyoyakıt, havayolu taşımacılığında ise SAF yakıtı olarak yer almıştır. Özellikle gelecekte arazi kullanımıyla paralel olarak tarımsal faaliyetlerde pirinç, patates, ayçiçeği, kolza, şeker kamışı, tütün, pamuk, fındık, soya, mısır, palmiye, aspir vb. ürünlerin gıda arzını etkilemeden biyoyakıt olarak kullanım miktarlarının artırılması NSE senaryolarında özellikle artık emisyonlar olarak kalan denizyolu taşımacılığının nihai enerji tüketimi ve emisyonlarında önemli oranlarda azalma sağlayacaktır.

Net sıfır emisyon hedefi kapsamında ulaştırma sektörünün elektrifikasyonu, elektrik üretim portföyünde yer alan temiz yakıtlı ve yenilenebilir enerji kaynaklı santrallerin ağırlığının artırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada yapılan analize göre, IEA'nın öngörüsü ve Türkiye'nin mevcut elektrik üretim portföyü doğrultusunda, ulaştırma sektöründe elektrifikasyonun artırılmasının ek maliyetinin elektrik üretimi yatırımları için yaklaşık 34,4 milyar \$ olacağı değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, bu elektrifikasyonun 30 yıl içinde ulaştırma sektörü yatırımlarına getireceği ek maliyet 406 milyar \$, yıllık ortalama ek maliyet 13,5 milyar \$, önümüzdeki 30 yıl için ödenecek artan yıllık maliyet ise Türk vatandaşı başına yaklaşık 127 \$/yıl'dır.

Çalışmada elde edilen senaryo sonuçları, ulaştırma sektörü kaynaklı enerji talebi ile CO₂ emisyonları arasındaki karşılıklı ilişkiyi göstermekte ve bunun yanında ilgili enerji talebinin hangi kaynaklardan karşılanacağı konusunda da önemli bir probleme işaret etmektedir. Birçok sektörde olduğu gibi ulaştırma sektöründe de elektrifikasyon net sıfır emisyon hedefinin ana girdisi olacaktır. Çalışma bazında bu girdiyi oluşturan elektrikli araçlar, özellikle birçok termik santralden oluşan heterojen enerji santrali portföyüne sahip ülkelerde, ulaştırma sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltırken, toplam CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaya yardımcı olmayacaktır. Bu durum gelecekte yapılacak

çalışmalarda elektrik üretim portföyü analizlerinin dahil edildiği sistematik modelleme çalışmalarının yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Elektrik üretim sektöründe ihtiyaç duyulan temiz enerji kaynaklarından yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeliyle beraber kömür ve doğal gaz santrallerinin karbon salınımı üst limitleri dikkate alındığında nükleer santrallere olan ihtiyaç büyük önem arz etmektedir. Bu ihtiyacı karşılayacak kapasitenin belirlenmesinde nükleer tesisler için saha potansiyeli, Küçük Modüler Reaktörler (SMR) konusunda teknolojik ve maliyet etkinliği üzerine gelişmeler ve fosil yakıtlı santraller için CCS teknolojileri önemli konular olarak ön plana çıkmaktadır. Özellikle CCS teknolojilerinin elektrik arz sistemine entegrasyonu nükleer santraller için ihtiyaç duyulacak kapasite miktarını belirleyecektir. Bu anlamda CCS teknolojisine sahip kömür ve doğal gaz santrallerinin ileriki yıllarda ilk yatırım maliyetlerinin azalması, teknoloji gelişimi ile verimlilik artışı ve tutulacak karbon miktarının depolanacağı sahaların ortaya çıkması ile kömür ve doğal gaz yakıtlı CCS teknolojisine sahip termik santrallerin üretim portföyüne dahil olabileceği değerlendirilmektedir. Dolayısıyla Çizelge 6.6 ve Çizelge 6.7'deki belli varsayımlara dayalı yapılan analizler bu açıdan bir örnek olup Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Türkiye Ulusal Enerji Planı bu kapsamda önemli bir bakış açısı sağlamaktadır. Bu anlamda gelecekteki akademik çalışmalarda, diğer nihai enerji tüketimini oluşturan sektörler olan sanayi, konut, tarım ve hizmetler sektörlerinin net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda bütüncül bir yaklaşımla ele alınması sonucunda ortaya çıkacak elektrifikasyonun, talep ve elektrik arz tarafında ayrı bir analiz konusu ve çalışmaları ortaya çıkaracaktır. Çünkü elektrikli araçların Türkiye dağıtım şebekesine getireceği yük dağılımları ve temiz enerji kaynağı olarak büyük miktarlarda yenilenebilir enerjinin sisteme entegrasyonu, enerji arz güvenliği konusunda önemli esneklik modelleri ve analizleri de gerektirecektir.

Birçok ülkede ve Türkiye'de ulaştırma sektörü emisyonları her yıl düzenli olarak artmaktadır. Ulaştırma sektörünün potansiyeli, hem artan CO₂ emisyonlarının etkisi hem de bu emisyonların azaltılmasında sahip olduğu dinamikler sayesinde sektörü net sıfır emisyon hedefleri kapsamında önemli bir noktada konumlandırmaktadır. Ayrıca ulaştırma sektörü, diğer sektörlerden farklı olarak maliyet optimizasyonunun yanında davranışsal değişiklikler kaynaklı önemli bir emisyon azaltım potansiyeli de taşımaktadır. Bu nedenle çevre, sağlık ve enerji üçgeninde toplumsal farkındalığın eş zamanlı olarak geliştirilmesi de belirlenen hedeflere ulaşılmasında kilit unsurlardan biri olacaktır.

KAYNAKLAR

- Ackerman, F., Decanio, S. J., Howarth, R. B., and Sheeran, K. (2009). Limitation of integrated assessment models of climate change. *Climate Change*, 95, 297-315.
- Al-Enazi, A., Okonkwo, E., Bicer, Y., and Al-Ansari, T. (2021). A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation. *Energy Reports*, 7, 1962-1985.
- Amry, Y., Elbouchikhi, E., Gall, F.L., Ghogho, M., and Hani, S.E. (2022). Electric vehicle traction drives and charging station power electronics: Current status and challenges. *Energies*, 15(16), 6037.
- Anas, A. (1983). Discrete choice theory, information theory and the multinomial logit and gravity models. *Transportation Research Part B: Methodological*, 17 (1), 13-23.
- Anselma, P.G. (2022). Computationally efficient evaluation of fuel and electrical energy economy of plug-in hybrid electric vehicles with smooth driving constraints. *Applied Energy*, 307, 118247.
- Aydın, A. (2021). Türkiye havayolu taşımacılığı sektörünün yapısal analizi. *İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*, 10 (2), 55-69.
- Bamwesigye, B., and Hlavackova, P. (2019). Analysis of sustainable transport for smart cities. *Sustainability* 2019, 11(7), 2140.
- Barker, T. (1999). Achieving a 10% cut in Europe's carbon dioxide emissions using additional excise duties: Coordinated, uncoordinated and unilateral action using the econometric model E3ME. *Economic System Research*, 11, 401-422.
- Bataille. C., Wolinetz. M., Peters. J., Bennett. M., and Rivers, N. (2009). Exploration of two Canadian greenhouse gas emissions targets: 25% below 1990 and 20% below 2006 levels by 2020: Final Report. *MKJA*. Vancouver, 2-12.
- Bernard, A. L., and Vielle, M. (2003). Measuring the welfare cost of climate change policies: A comparative assessment based on the computable general equilibrium model GEMINI-E3. *Environmental Modeling and Assessment*, 8, 199-217.
- Bhattacharyya, S. C., Timilsina, G. R. (2009), Energy demand models for policy formulation: A comparative study of energy demand models. *WB*. Washington. 8-144
- Bosetti, V., Carraro, C., Galeotti, M., Massetti, E., and Tavoni, M. (2006). Witch a world induced technical change hybrid model. *The Energy Journal*, 27, 13-37.
- Böhringer, C., Cantner, U., Costard, J., Kramkowski, L.V., Gatzen, C., and Pietsch, S. (2020). Innovation for the German energy transition - Insights from an expert survey. *Energy Policy*, 144, 111611.
- Brand, C., Anable, J., Ketsopoulou, I., and Watson, J. (2020). Road to zero or road to nowhere? Disrupting transport and energy in a zero carbon world. *Energy Policy*, 139, 111334.

- Brugger, H., Eichhammer, W., Mikova, N., and Dönitz, E. (2021). Energy efficiency vision 2050: How will new societal trends influence future energy demand in the European countries? *Energy Policy*, 152, 112216.
- Bruzzone, F., Cavallaro, F., and Nocera, S. (2021). The integration of passenger and freight transport for first-last mile operations. *Transport Policy*, 100, 31-48.
- Bulut, U., and Muratoglu, G. (2018). Renewable energy in Turkey: Great potential, low but increasing utilization, and an empirical analysis on renewable energy-growth nexus. *Energy Policy*, 123, 240-250.
- Burniaux, J. M., Nicoletti, G., Martins, J. O., and Martin, J. P. (1991). Green: A multi region dynamic general equilibrium model for quantifying the costs of curbing CO₂ emissions: A Technical Manual. *OECD*, Paris, 2-5.
- Butyrkin, A.Y., Kulikova, E.B., Madyar, O.N., and Dmitrieva, E.I. (2020, 22-27 May). *Models for predicting passenger traffic in rail and air transport*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Novosibirsk, 1-9.
- Canaz, C. (2019). *Transport sector energy use, electric vehicle deployment and CO₂ emissions in Turkey: An evaluation using the Boğaziçi University Energy Modeling System*. Master Thesis. Boğaziçi University Graduate School of Natural and Applied Sciences, İstanbul.
- Capros, P., Georgakopoulos, P., Zografakis, S., Regemorter, D.V., and Proost, S. (1996). Co-ordinated versus uncoordinated European carbon tax solutions analysed with GEM-E31 linking the EU-12 countries. *Climate Change, Transport and Environmental Policy*, 1001, 1-6.
- Capros, P., Kannavou, M., Evangelopoulou, S., Petropoulos, A., Siskos, P., Tasios, N., Zazias, G., and DeVita, A. (2018). Outlook of the EU energy system up to 2050: The case of scenarios prepared for European Commission's "clean energy for all Europeans" package using the PRIMES model. *Energy Strategy Review*, 22, 255-263.
- Cascajo, R., Olvera, L.D., Monzon, A., Plat, D., and Ray, J.B. (2018). Impacts of the economic crisis on household transport expenditure and public transport policy: Evidence from the Spanish case. *Transport Policy*, 65, 40-50.
- Catenazz, G. (2009). *Advances in Techno-economic Energy Modeling Costs, Dynamics and Hybrid Aspects*, Doctoral Thesis. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich. 5-12.
- Cedillo-Campos, M.G., Piña-Barcenas, J., Pérez-González, C.M., and Mora-Vargas, J.M. (2022). How to measure and monitor the transportation infrastructure contribution to logistics value of supply chains? *Transport Policy*, 120, 120-129.
- Cowen, C. (2010). A Geography of Logistics: Market Authority and the Security of Supply Chains. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(3), 600-620.

- Cunanan, C., Tran, M.K., Lee, Y., Kwok, S., Leung, V., and Fowler, M. (2021). A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. *Clean Technologies*, 3(2), 474-489.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2011). İklim Değişikliği Eylem Planı 2011-2023. *ÇŞİDB*. Ankara. 1-77.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). Çevresel Göstergeler Kitapçığı. *ÇŞİDB*. Ankara. 16-192.
- Çodur, M. K. (2021). Transportation energy demand modeling with artificial neural networks. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(4), 2706-2715.
- Davies, E. G. R., and Simonovic, S. P. (2011). Global water resources modeling with an integrated model of the social–economic–environmental system. *Advances in Water Resources*, 34, 684-700.
- Denizcilik Genel Müdürlüğü. (2020). Deniz Ticareti İstatistikleri. *DGM*. Ankara. 1-58.
- Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü. (2020). Havayolu Sektör Raporu. *DHMI*. Ankara. 1-56.
- Dirkse, S. P., and Ferris, M. C. (1995). MCPLIB: A collection of nonlinear mixed complementarity problems. *Optimization Methods And Software*, 5(4), 319-345.
- Edenhofer, O., Bauer, N., and Kriegler, E. (2005). The impact of technological change on climate protection and welfare: Insights from the model MIND. *Ecological Economics*, 54, 277-292.
- Energy Information Administration. (2021). International Energy Outlook 2021: with projections to 2050. *EIA*. Washington. 1-21.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2018). Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023. *ETKB*. Ankara, 1-108.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). Ulusal Enerji Denge Tabloları. *ETKB*. Ankara. 1-2.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022a). Türkiye Ulusal Enerji Planı (TUEP). *ETKB*. Ankara. 7-45.
- E3Modelling. (2018). Primes Model. *E3M*. Athens. 2-221.
- Fernández, X., Gundelfinger, J., and Coto-Millán, P. (2022). The impact of logistics and intermodality on airport efficiency. *Transport Policy*, 124, 233-239.
- Ferris, M. C., and Pang, J. S. (1997). Engineering and economic applications of complementarity problems. *Siam Review*, 39(4), 669-713.

- Fleiter, T., Worrell, E., and Eichhammer, W. (2011). Barriers to energy efficiency in industrial bottom-up energy demand models—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (6), 3099-3111.
- Frenzel, I., Anderson, J., Lischke, A., and Eisenmann, C. (2021). Renewable fuels in commercial transportation: Identification of early adopter, user acceptance, and policy implications. *Transport Policy*, 9(3), 1245-1260.
- Ghosh, A. (2020). Possibilities and Challenges for the Inclusion of the Electric Vehicle (EV) to Reduce the Carbon Footprint in the Transport Sector: A Review. *Energies*, 13(10), 2602.
- Grubb, M., Joe, E., Brick., P. T., and Morrison., M. (1993). The cost of limiting fossil-fuel CO₂ emissions: A survey and analysis. *Annual Review of Energy and the Environment*, 18, 397–478.
- Güzel, D. T., and Alp, K. (2020). Modeling of greenhouse gas emissions from the transportation sector in Istanbul by 2050. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2190-2201.
- Haller, M., Ludig, S., and Bauer, N. (2012). Decarbonization scenarios for the EU and MENA power system: Considering spatial distribution and short term dynamics of renewable generation. *Energy Policy*, 47, 282-290.
- Hepburn, C., Qi, Y., Stern, N., Ward, B., Xie, C., and Zenghelis, D. (2021). Towards carbon neutrality and China's 14th Five-Year Plan: Clean energy transition, sustainable urban development, and investment priorities. *Environmental Science and Ecotechnology*, 8, 100130.
- Herbst, A., Toro, F., Reitze, F., and Jochem, E. (2012). Introduction to energy systems modelling. *Swiss Journal of Economics and Statistics*, 148, 111–135.
- Hourcade, J. C., Jaccard, M., Bataille, C., and Gherzi, F. (2006). Hybrid modeling: New answers to old challenges. *Introduction to the Special Issue of the Energy Journal*, 2, 1-12.
- International Energy Agency. (2020). Advanced Biofuels-Potential for Cost Reduction, *IEA*, Paris. 12-69.
- International Energy Agency. (2022). Global EV Outlook 2022. *IEA*. Paris. 12-202.
- International Energy Agency. (2021c). Global Hydrogen Review 2021. *IEA*. Paris. 10-203.
- International Energy Agency. (2021b). Net Zero by 2050-A Roadmap for the Global Energy Sector. *IEA*. Paris. 29-187.
- International Energy Agency. (2019). Nuclear Power in a Clean Energy System. *IEA*. Paris. 7-90.
- International Energy Agency. (2021). World Energy Outlook 2021. *IEA*. Paris. 27-282.

International Council on Clean Transportation. (2022). Charging solutions for battery-electric trucks. *THEICCT*. Washington. 1-29.

İnternet: Anadolu Ajansı. (2022). Türkiye doubles its target to reduce carbon emissions to 41%. URL: <https://www.aa.com.tr/en/environment/turkiye-doubles-its-target-to-reduce-carbon-emissions-to-41-/2738781>, Son Erişim Tarihi: 28.01.2022.

İnternet: Climate Action Tracker. (2020). Decarbonising the Indian transport sector pathways and policies. URL: https://climateactiontracker.org/documents/832/CAT_2020-12-09_Report_DecarbonisingIndianTransportSector_Dec2020.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.03.2023.

İnternet: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). Ulaştırma Türlerine Göre Taşınan Yolcu ve Yük Miktarı. URL: <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turlerine-gore-tasinan-yolcu-ve-yuk-miktari-i-85789>, Son Erişim Tarihi: 22.11.2022.

İnternet: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022a). Ulaştırma Türüne Göre Sera Gazı Emisyonları. URL: <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turune-gore-seragazi-emisyonu-i-85790#:~:text=Tan%C4%B1m%C4%B1%3A%20Ula%C5%9F%C4%B1rman%20kaynaklanan%20sera%20gaz%C4%B1,ve%20deniz%20ta%C5%9F%C4%B1mac%C4%B1%C4%B1%C4%B1%20dahil%20de%C4%9Fildir>, Son Erişim Tarihi: 17.09.2022.

İnternet: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. URL: (2022b). Ulusal Katkı Beyanı, <https://ab.csb.gov.tr/en/minister-murat-kurum-announced-the-update-of-turkiyes-national-contribution-statement-news-279512>, Son Erişim Tarihi: 20.11.2022.

İnternet: Consumer News and Business Channel. (2021). The road to net-zero transport could cost Asia over \$12 trillion, report finds. URL: <https://www.cnn.com/2021/09/21/climate-change-net-zero-carbon-emissions-could-cost-asia-trillions-idx.html>, Son Erişim Tarihi: 21.09.2022.

İnternet: European Commission. (2021c). 2030 Climate Target Plan. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal/2030-climate-target-plan_en#:~:text=With%20the%202030%20Climate%20Target,40%25EN%E2%80%A2%E2%80%A2%E2%80%A2, Son Erişim Tarihi: 10.10.2022.

İnternet: European Commission. (2020). CO₂ emission performance standards for cars and vans. URL: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en#:~:text=In%20the%20years%20from%202020,as%201.67%20vehicles%20in%202021, Son Erişim Tarihi: 28.07.2022.

İnternet: European Commission. (2020a). Communication COM/2020/562: Stepping up Europe's 2030 climate ambition Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people. URL: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/communication-com2020562-stepping-europe%E2%80%99s-2030-climate-ambition-investing-climate_en, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.

İnternet: European Commission. (2021a). Efficient and Green Mobility. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/efficient-and-green-mobility-2021-12-14_en, Son Erişim Tarihi: 10.11.2022.

İnternet: European Commission. (2021). Fit for 55. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>, Son Erişim Tarihi: 12.12.2022.

İnternet: European Commission. (2020b). Reference Scenario 2020 (REF2020). URL: https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020_en, EC. Son Erişim Tarihi: 10.12.2022.

İnternet: European Commission. (2017). Results of the EUCO3232.5 scenario on Member States. URL: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2019-06/technical_note_on_the_euco3232_final_14062019_0.pdf, Son Erişim Tarihi: 23.09.2022.

İnternet: European Commission. (2021c). Questions and Answers: Commission proposal on the new Euro 7 standards. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_22_6496, Son Erişim Tarihi: 20.12.2022.

İnternet: European Union. (2016). EU Reference Scenario 2016, Energy, transport and GHG emissions: trends to 2050. URL: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-11/full_referencescenario2016report_en.pdf, Son Erişim Tarihi: 05.08.2022

İnternet: European Environment Agency. (2021). Exposure of Europe's population to environmental noise. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/exposure-to-and-annoyance-by-2/assessment-4>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2022.

İnternet: European Union. (2019). Instrument For Pre-Accession Assistance (IPA) Energy Sector Technical Assistance Project, The Energy System Model for Turkey. URL: <https://scenarios2013.enerjiProjeleri.eu/Dosyalar/Etkinlikler/Training%203/Day%201%20-%20Introduction%20to%20EST.pdf>, Son Erişim Tarihi: 17.08.2022.

İnternet: Eurostat. (2022a). Greenhouse gas emission statistics - emission inventories. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse_gas_emission_statistics_-_emission_inventories#Trends_in_greenhouse_gas_emissions, Son Erişim Tarihi: 11.09.2022.

İnternet: Eurostat. (2022b). Passenger mobility statistics. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_mobility_statistics, Son Erişim Tarihi: 24.10.2022.

İnternet: Eurostat. (2023). Complete energy balances. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_BAL_C_custom_5938079/default/table?lang=en, Son Erişim Tarihi: 03.02.2023.

- İnternet: Eurostat. (2023a). Passenger cars per 1.000 inhabitants. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ROAD_EQS_CARHAB/default/table?lang=en&category=road.road_eqs, Son Erişim Tarihi: 02.02.2023.
- İnternet: Fool. (2016). Falling Battery Prices Will Open Up a World of Innovation. URL: <https://www.fool.com/investing/2016/10/26/falling-battery-prices-will-open-up-world-of-innov.aspx>, Son Erişim Tarihi: 09.12.2022.
- İnternet: Harvard University. (2013). Lima Metro Line 1- Peru. URL: https://research.gsd.harvard.edu/zofnass/files/2022/07/11_Line_1_Lima_EN.pdf, Son Erişim Tarihi: 20.01.2023.
- İnternet: International Energy Agency. (2021a). Net Zero by 2050 Data Browser. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/net-zero-by-2050-data-explorer>, Son Erişim Tarihi: 15.01.2023
- İnternet: International Energy Agency. (2022). Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales. URL: <https://www.iea.org/commentaries/electric-cars-fend-off-supply-challenges-to-more-than-double-global-sales>, Son Erişim Tarihi: 10.01.2023.
- İnternet: İstanbul Enerji Borsası. (2022). URL: <https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/uretim/gerceklesen-uretim/gercek-zamanli-uretim.xhtml>, Son Erişim Tarihi: 09.08.2022.
- İnternet: Karayolları Genel Müdürlüğü. (2020). Trafik ve Ulaşım Araştırması. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteEng/Statistics/TrafficTransportationSurvey.aspx>, Son Erişim Tarihi: 17.09.2022.
- İnternet: Ministry of Foreign Affairs. (2021). Paris Agreement and Türkiye's position. URL: <https://www.mfa.gov.tr/united-nations-framework-convention-on-climate-change-unfccc-and-the-kyoto-protocol.en.mfa>, Son Erişim Tarihi: 24.06.2022.
- İnternet: Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). International trade during the COVID-19 pandemic: Big shifts and uncertainty. URL: <https://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/international-trade-during-the-covid-19-pandemic-big-shifts-and-uncertainty-d1131663/>, Son Erişim Tarihi: 10.01.2023.
- İnternet: Organisation for Economic Co-operation and Development. (2021). The Long Game: Fiscal Outlooks to 2060 Underline Need for Structural Reform. URL: <https://www.oecd.org/economy/growth/scenarios-for-the-world-economy-to-2060.htm>, Son Erişim Tarihi: 16.08.2022.
- İnternet: Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). Passenger transport. URL: <https://data.oecd.org/transport/passenger-transport.htm>, Son Erişim Tarihi: 17.08.2022.
- İnternet: Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü. (2022). Havayolu Uçak Filosu İstatistikleri. URL: <https://web.shgm.gov.tr/en/kurumsal/6463-statistics>, Son Erişim Tarihi: 02.08.2022.

- İnternet: T.C. Resmi Gazete. (2021). Uluslararası Paris Anlaşması. URL: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/10/20211007M1-1.pdf>, Son Erişim Tarihi: 02.08.2022.
- İnternet: Türkiye İstatistik Kurumu. (2018). Nüfus Projeksiyonları, 2018-2080. URL: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Nufus-Projeksiyonlari-2018-2080-30567>, Son Erişim Tarihi: 02.10.2022.
- İnternet: Türkiye İstatistik Kurumu. (2020). Araç-kilometre İstatistikleri. URL: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tasit-kilometre-Istatistikleri-2020-45784>, Son Erişim Tarihi: 04.08.2022.
- İnternet: Türkiye İstatistik Kurumu. (2022). Dış Ticaret İstatistikleri. URL: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Dis-Ticaret-Istatistikleri-Ekim-2022-45545>, Son Erişim Tarihi: 01.01.2023.
- İnternet: Türkiye İstatistik Kurumu. (2022). Sera Gazı Emisyon İstatistikleri. URL: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2020-45862>, Son Erişim Tarihi: 01.01.2023.
- İnternet: United Nations Economic Commission for Europe. (2021). Estimating emissions from road transport to facilitate sound policy solutions in Eastern Europe, the Caucasus and Central Asia. URL: <https://unece.org/media/news/357458>, Son Erişim Tarihi: 10.01.2023.
- İnternet: U.S. Energy Information Administration. (2023). Annual Energy Outlook 2023. URL: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/info_nems_archive.php, Son Erişim Tarihi: 20.02.2023.
- İnternet: Volvo. (2020). Electric Roads: A niche solution for confined areas? URL: <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/insights/articles/2020/jul/electric-roads-a-niche-solution-for-confined-areas.html>, Son Erişim Tarihi: 15.11.2022.
- İnternet: World Bank. (2022d). Türkiye Country Climate and Development Report. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/c82ebb1b-b400-59af-a32e-547fafde0056/content>, Son Erişim Tarihi: 24.01.2023.
- İnternet: World Bank. (2022e). From knowledge to action: A new way to maximize the impact of rural roads. URL: <https://blogs.worldbank.org/transport/knowledge-action-new-way-maximize-impact-rural-roads>, Son Erişim Tarihi: 20.01.2023.
- İnternet: World Bank. (2023e). Transport. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/transport/overview>, Son Erişim Tarihi: 10.01.2023.
- İnternet: World Bank. (2022a). World development indicators: GDP. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD>, Son Erişim Tarihi: 16.08.2022.
- İnternet: World Bank. (2022b). World development indicators: Population. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>, Son Erişim Tarihi: 24.08.2022.

İnternet: World Bank. (2022c). CO₂ emissions. URL: https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT?name_desc=true, Son Erişim Tarihi: 07.09.2022.

İnternet: World Bank. (2023). Transport. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/transport/overview>, Son Erişim Tarihi: 20.02.2023.

Kannavou, M., Zampara, M., and Capros, P. (2019). Modelling the EU internal electricity market: The PRIMES-IEM Model. *Energies*, 12(15), 2887.

Kapustin, N.O., and Grushevenko, D.A. (2020). Long-term electric vehicles outlook and their potential impact on electric grid. *Energy Policy*, 137, 111103.

Kat, B., (2011). *Mathematical modelling for energy policy analysis*, Doctoral Thesis, Middle East Technical University, Ankara. 1-211.

Kejun, J., Chenmin, H., Songli, Z., Pianpian, X., and Sha, C. (2021). Transport scenarios for China and the role of electric vehicles under global 2 °C/1.5 °C targets. *Energy Economics*, 103, 105172.

Kelly, D. L., and Kolstad, C. D. (1999). Integrated Assessment Models for Climate Change Control. *IYERE*. Cheltenham. 3-26.

Köhler, J., Barker, T., Anderson, D., and Haoran., P. (2006). Combining energy technology dynamics and macroeconometrics: The E3MG model. *The Energy Journal*, 113-133.

Kumbaroğlu, G., Canaz, C., Deason, J. and Shittu, E. (2020). Profitable Decarbonization through E-Mobility. *Energies*, 13(16), 4042.

Legacy, C., Curtis, C., and Sturup, S. (2012). Is there a good governance model for the delivery of contemporary transport policy and practice? An examination of Melbourne and Perth. *Transport Policy*, 19(1), 8-16.

Lin, Y., Qin, Y., Wu, J., and Xu, M. (2021). Impact of high-speed rail on road traffic and greenhouse gas emissions. *Nature Climate Change*, 11, 952–957.

Loulou, R., Goldstein, G., and Noble, K. (2004). Documentation for the MARKAL Family of Models. *Energy Technology Systems Analysis Programme*, IEA. 9-130.

Loulou, R., Goldstein, G., Kanudia, A., Lettila, A., and Remme, U. (2016). Documentation for the TIMES model Part I. *Energy Technology Systems Analysis Programme*, IEA-ETSAP. 9-120.

Löschel, A. (2002). Technological change in economic models of environmental policy: A survey. *Ecological Economics*, 43, 105-126.

Maduekwe, M., Akpan, U., and Isihak, S. (2020). Road transport energy consumption and vehicular emissions in Lagos, Nigeria: An application of the LEAP model. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 6, 100172.

- Mahapatra, S., Kumar, D., Singh, B., and Sachan, P.K. (2021). Biofuels and their sources of production: A review on cleaner sustainable alternative against conventional fuel, in the framework of the food and energy nexus. *Energy Nexus*, 4, 100036.
- Manne, A. S., and Wene, C. O. (1992), Markal-macro: A linked model for energy-economy analysis. BNL. *Technical Report*. 1-51.
- Marchi, E., Chung, W., Visser, R., Abbas, D., Nordfjell, T., Mederski, P.S., McEwan, A., Brink, M., and Laschi, A. (2018). Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate. *Science of the Total Environment*, 634, 1385-1397.
- Meckling, J., and Nahm, J. (2019). The politics of technology bans: Industrial policy competition and green goals for the auto industry. *Energy Policy*, 126, 470-479.
- Messner, S., and Strubegger, M. (1995). User's Guide for MESSAGE III Working Paper. *IIAS*. Laxenburg. 3-150.
- Miller, R. E., and Blair, P. D. (2009). Input-Output Analysis Foundation and Extensions. Second Edition. *CUP*. Cambridge. 10-687.
- Morfeltdt, J., Kurland, D. S., and Johansson, D. J. A. (2021). Carbon footprint impacts of banning cars with internal combustion engines. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 95, 102807.
- Mundaca, L., Neij, L., Worrell, E., and McNeil, M. (2010). Evaluating energy efficiency policies with energy-economy models. *Annual Review of Environment and Resources*, 35 (1), 305-344.
- Nakata, T. (2004). Energy-economic models and the environment. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 417-475.
- Nam, K.M., Selin, N.E., Reilly, J.M., and Paltsev, S. (2010). Measuring welfare loss caused by air pollution in Europe: A CGE analysis. *Energy Policy*, 38, 5059–5071.
- Nordhaus, W. D., and Yang, Z. (1996). A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies. *American Economic Review*, 86 (4), 741-765.
- Notteboom, T. (2013). Transport Policy Instruments, *HTS*, London. 281-292.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). ITF Transport Outlook 2019. *OECD*. Paris. 1-254.
- Ortiz, R. A., and Markandya, A. (2009). Integrated Impact Assessment Models of Climate Change with an Emphasis on Damage Functions: A Literature Review. *Technical report, Basque Centre for Climate Change Working Paper Series*. 2009 (6), 1-35.
- Ovaere, M., and Proost, S. (2022). Cost-effective reduction of fossil energy use in the European transport sector: An assessment of the Fit for 55 Package. *Energy Policy*, 168, 113085.

- Oxford. (2019). A review of prospects for natural gas as a fuel in road transport. *OIES*, Oxford. 1-32.
- Plessmann, G., and Blechinger, P. (2017). How to meet EU GHG emission reduction targets? A model based decarbonization pathway for Europe's electricity supply system until 2050. *Energy Strategy Reviews*, 15, 19-32.
- Prus, P., and Sikora, M. (2021). The Impact of Transport Infrastructure on the Sustainable Development of the Region-Case Study. *Agriculture*, 11(4), 279.
- Roberts, B., Rose, A., Heatwole, N., Wei, D., Avetisyan, M., Chan, O., and Maya, I. (2014). The impact on the US economy of changes in wait times at ports of entry. *Transport Policy*. 35, 162-175.
- Rodrigues, R., Pietzcker, R., Fragkos, P., Price, J., McDowall, W., Siskos, P., Fotiou, T., Luderer, G., and Capros, P. (2022). Narrative-driven alternative roads to achieve mid-century CO₂ net neutrality in Europe. *Energy*, 239, 121908.
- Rutherford, T. F. (1995). Extension of GAMS for complementarity problems arising in applied economic analysis. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 19(8), 1299-1324.
- Sabancı Üniversitesi, (2022). Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası 2050'de Net Sıfır. *SÜ*, İstanbul. 12-120.
- Salvucci, R., and Tattini, J. (2019). Global outlook for the transport sector in energy scenarios. *DTU International Energy*, 2019, 21-29.
- Sasai, Y., Imagawa, T., Hasegawa, T., and Ono, M. (2010). The prediction of CO₂ emissions up to 2020 in Japanese economic activities. *The Journal of Econometric Study of Northeast Asia*, 8 (1), 75-100.
- Schnurr, R., and Walker, T. (2019). Marine transportation and energy use. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 1-7.
- Siemens. (2021). eHighway – Solutions for electrified road freight transport. *Siemens*, Munich. 1-4.
- Siskos, P., Zazias, G., Petropoulos, A., Evangelopoulou, S., and Capros, P. (2018). Implications of delaying transport decarbonisation in the EU: A systems analysis using the PRIMES model. *Energy Policy*, 121, 48-60.
- Skov, I.R., and Schneider, N. (2022). Incentive structures for power-to-X and e-fuel pathways for transport in EU and member states. *Energy Policy*, 168, 113121.
- Solaymani, S. (2019). CO₂ emissions patterns in 7 top carbon emitter economies: The case of transport sector. *Energy*, 168, 113121.
- Sovacool, B.K., Kim, J., and Yang, M. (2021). The hidden costs of energy and mobility: A global meta-analysis and research synthesis of electricity and transport externalities. *Energy Research and Social Science*, 72, 101885.

- Subramarian, A. S. R., Gundersen, T., and Adams, T. A. (2018). Modeling and simulation of energy systems: A review. *Processes*, 6 (12), 238.
- Süsser, D., Ceglaz, A., Gaschnig, H., Stavrakas, V., Flamos, A., Giannakidis, G., and Lilliestam, J. (2021). Model-based policymaking or policy-based modelling? How energy models and energy policy interact. *Energy Research and Social Science*, 75, 101984.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2020). National greenhouse gas inventory, Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF) report. *TÜİK*. Ankara. 1-576.
- Turkish Chamber of Shipping. (2020). Maritime Sector Report. *TCS*. İstanbul. 1-318.
- Transport and Environment. (2021). Advanced renewable fuels in EU Transport. *TE*. Brussels. 1-28.
- Trump, D.J. (2017). National Security Strategy of the United States of America. *White House Office*. Washington. 1-24.
- Tsani, S., and Kozlova, M. (2021). Energy modeling for sustainable policymaking: state of the art and future challenges. *Political Science and Public Policy*, 21, 334-347.
- Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2022). 2053 Ulaştırma ve Lojistik Master Planı. *UAP*. Ankara. 1-60.
- United Nations. (2022). Sustainable and resilient transport and trade facilitation in times of pandemic and beyond: Key challenges and opportunities. *UN*. New York. 1-18.
- United Nation Climate Change. (2015a). Paris Agreement. *UNFCCC*. Bonn. 1-27.
- United Nation Climate Change. (2015b). Republic of Turkey Intended Nationally Determined Contribution. *UNFCCC*. Bonn. 1-5.
- United Nation Climate Change. (2022a). Turkey, 2022 National Inventory Report (NIR). *UNFCCC*. Bonn. 1-576.
- United Nation Climate Change. (2022b). National Inventory Submissions 2022. *UNFCCC*, Bonn. 1-576.
- United Nations Conference on Trade and Development. (2022). Review of maritime transport 2022. *UNCTAD*. Geneva. 1-195.
- U.S. Department Of Commerce. (1992). Regional Multipliers: A user handbook for the regional input-output modeling system (RIMS II). *USDC*, Washington. 1-72.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2022). Fuel economy- all-electric vehicles. *EPA*. Washington. 1-30.
- Van Beeck, N. (1999). Classification of Energy Models. *Internal Report no. FEW 777, Tilburg University*. Kuzey Brabant. 1-26.

- Vrontisi, Z., Fragkiadakis, K., Kannavou, M., and Capros, P. (2020). Energy system transition and macroeconomic impacts of a European decarbonization action towards a below 2°C climate stabilization. *Climatic Change*, 162(4), 1857-1875.
- Werner, F., Taverna, R., Hofer, P., Thürig, E., and Kaufmann, E. (2010). National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Environmental Science and Policy*, 13(1), 72-85.
- Weyant, J., Davidson, O., Dowlatabadi, H., Edmonds, J., Grubb, M., Richels, R., Rotmans, J., Shukla, P., Cline, W., Fankhauser, S., and Tol, R. (1996). Integrated Assessment of Climate Change: An Overview and Comparison of Approaches and Results. *CUP*, Cambridge. 1-30.
- Wickham, D., Hawkes, A., and Jalil-Vega, F. (2022), Hydrogen supply chain optimisation for the transport sector – Focus on hydrogen purity and purification requirements. *Applied Energy*, 305, 117740.
- World Road Association. (2018). Electric road systems: a solution for the future? *PIARC*, Paris. 1-100.
- Yin, X., Chen, W., Eom, J., Clarke, L.E., Kim, S.H., Patel, P.L., Yu, S., and Kyle, G.P. (2015). China's transportation energy consumption and CO₂ emissions from a global perspective. *Energy Policy*, 82, 233-248.
- Yoro, K. O., Daramola, M. O., Sekoai, P. T., Wilson, U. N., and Eterigho-Ikelegbe, O. (2021). Update on current approaches, challenges, and prospects of modeling and simulation in renewable and sustainable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111506.





Gazili olmak ayrıcalıktır