

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL'DA ULAŞTIRMA SEKTÖRÜNÜN İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE
ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Tuğba DOĞAN GÜZEL

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri Mühendisliği ve Yönetimi Programı

EYLÜL 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL'DA ULAŞTIRMA SEKTÖRÜNÜN İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE
ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Tuğba DOĞAN GÜZEL
(501142712)**

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri Mühendisliği ve Yönetimi Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kadir ALP

EYLÜL 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501142712 numaralı Doktora Öğrencisi Tuğba DOĞAN GÜZEL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “İSTANBUL'DA ULAŞTIRMA SEKTÖRÜNÜN İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE ETKİSİNİN BELİRLENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Kadir ALP**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Burçak KAYNAK TEZEL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mete TAYANÇ
Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan Can OKUTAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Arslan SARAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 30 Temmuz 2021
Savunma Tarihi : 16 Eylül 2021





Aileme ve eşime,



ÖNSÖZ

Doktora eğitimim ve tez çalışmam süresince her türlü desteği sağlayan, yardımlarını esirgemeyen ve fikirleriyle bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Kadir ALP'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca teşvikleri, değerli katkıları ve yönlendirmeleri için tez izleme komitemde yer alan değerli hocalarım Doç. Dr. Burçak KAYNAK TEZEL ve Prof.Dr.Mete TAYANÇ'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam için modelleme altyapısını sunan çalışmakta olduğum TÜBİTAK MAM Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü'ne ve yönetimine şükranlarımı sunarım. Tez çalışmamın şekillenmesinde sağladığı katkılar ve faydalı yönlendirmelerinden ötürü Dr. Bilgin HİLMİOĞLU'na, verilerin derlenmesinde sağladığı katkılar sebebiyle Doç.Dr. Nesimi ÖZKURT'a, tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Ece Gizem ÇAKMAK ve Deniz SARI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam için gerekli olan verilerin toplanması aşamasındaki desteğinden ötürü İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü'ne, verilerin sağlanması noktasında değerli katkılarından ötürü İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve Sayın Mehmet ÇAKIR'a, Türkiye İstatistik Kurumu'na, Ford Otosan ve Sayın Koray KAVALCI'ya teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca her türlü desteği veren ve yardımlarını esirgemeyen annem Nergis DOĞAN, babam Cemal DOĞAN ile kardeşlerim Ayşegül DOĞAN ve Mustafa DOĞAN'a teşekkür ederim. Son olarak çalışmanın her aşamasındaki sonsuz desteğinden ötürü eşim Barış GÜZEL'e teşekkür ederim.

Temmuz 2021

Tuğba DOĞAN GÜZEL
(Çevre Yüksek Mühendisi/Endüstri Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
2. KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ	3
2.1 İklim Değişikliği ve Küresel Isınma	3
2.1.1 Sera gazları ve özellikleri.....	4
2.1.2 Küresel ısınma potansiyeli	6
2.1.3 Gelecekteki iklim öngörülleri	7
2.2 Uluslararası Müzakere Süreçleri ve Türkiye'nin Konumu	10
2.2.1 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve Kyoto Protokolü.....	10
2.2.2 Paris Anlaşması.....	11
2.2.3 Emisyon azaltım taahhütleri.....	12
2.3 Dünya ve Türkiye'nin Durumu	14
2.3.1 Enerji görünümü	14
2.3.2 Sera gazı emisyonları	18
3. ULAŞTIRMA SEKTÖRÜ	23
3.1 Türkiye'de Ulaştırma	23
3.2 İstanbul ve Ulaşım.....	28
3.2.1 İstanbul'un önemi	28
3.2.2 Karayolu ulaşımı	30
3.2.3 Havayolu ve denizyolu ulaşımı	31
3.2.4 Toplu Ulaşım.....	33
3.3 Ulaştırma Sektörü Sera Gazı Emisyonları.....	36
4. PLAN VE POLİTİKALAR.....	39
5. SERA GAZI EMİSYONU DEĞERLENDİRMESİNDE KULLANILAN YAKLAŞIMLAR.....	45
5.1 IPCC Metodolojisi.....	45
5.2 Ulaşım modellemesi	47
5.3 IVE	48
5.4 COPERT.....	50
5.5 MOVES.....	52
5.6 Enerji-Ekonomi-Çevre Modelleri	53
5.6.1 Tepeden aşağı (top-down) modeller	54
5.6.2 Temelden yukarı (bottom-up) modeller	56

5.6.3 Hibrit modeller	58
6. TIMES MODELİ	59
6.1 Modelin Temel Yapısı	60
6.1.1 Referans Enerji Sistemi (RES)	62
6.1.2 TIMES doğrusal programlama	62
6.1.2.1 İndisler	63
6.1.2.2 Karar Değişkenleri	63
6.1.2.3 Amaç Fonksiyonu	64
6.1.2.4 Kısıtlar	65
6.2 TIMES Veri İhtiyacı	67
6.3 TIMES Modeli ile Yapılan Çalışmalar	69
7. İSTANBUL ULAŞTIRMA SEKTÖRÜ OPTİMİZASYONU	75
7.1 Genel Bakış	75
7.2 Model Girdilerinin Belirlenmesi	78
7.2.1 Nüfus projeksiyonu	78
7.2.2 GSYİH Projeksiyonu	79
7.2.3 Talep tahminleri	80
7.2.3.1 Karayolu	80
Araç sayısı projeksiyonu	81
Talep tahminlerinin hesaplanması	85
7.2.3.2 Denizyolu	86
7.2.3.3 Havayolu	90
7.2.3.4 Demiryolu	92
7.2.4 Emisyon faktörleri ve verimlilik değerleri	94
7.2.5 Maliyet Verilerinin Belirlenmesi	98
7.3 Senaryo Analizleri	99
7.3.1 Mevcut durum senaryosu (Baz senaryo)	100
7.3.2 Karbon vergisi senaryoları	101
7.3.3 Elektrikli ve hibrit araç senaryoları	101
7.3.4 Emisyon limit senaryoları	102
7.3.5 Verimlilik senaryosu	102
7.3.6 Hidrojen yakıtlı araç senaryoları	103
7.3.7 Toplu önlem senaryosu	104
8. SONUÇLAR	105
8.1 Envanter Sonuçları ile Karşılaştırma	105
8.2 Yakıt Tüketimi	106
8.2.1 Baz Senaryo	106
8.2.2 Karbon vergisi senaryoları	109
8.2.3 Elektrikli ve hibrit araç senaryoları	126
8.2.4 Verimlilik ve emisyon limit senaryoları	113
8.2.5 Hidrojen yakıtlı araç senaryoları	119
8.2.6 Toplu önlem senaryosu	124
8.2.7 Yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması	126
8.2.8 Senaryoların elektrik tüketimleri	135
8.3 Sera Gazı Emisyonu	135
8.3.1 Baz Senaryo	136
8.3.2 Karbon vergisi senaryoları	138
8.3.3 Elektrikli ve hibrit araç senaryoları	143
8.3.4 Verimlilik ve emisyon limit senaryoları	151
8.3.5 Hidrojen yakıtlı araç senaryoları	157

8.3.6 Toplu önlem senaryosu	162
8.3.7 Sera gazı emisyonlarının karşılaştırılması	165
8.3.8 Elektrik üretim emisyonları	167
8.4 Hava Kirliliği Emisyonları	170
8.5 Maliyet	177
8.6 Değerlendirme ve Öneriler	180
KAYNAKLAR	185
EKLER	197
ÖZGEÇMİŞ	221





KISALTMALAR

AB	: United Nations (Avrupa Birliği)
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AÇA	: European Environment Agency (Avrupa Çevre Ajansı)
BMİDÇS	: United Nations Framework Convention on Climate Change (Birleşmiş Milletler İklim Değışikliği Çerçeve Sözleşmesi)
Bv-km	: Billion vehicle kilometer (Milyar araç kilometre)
CH₄	: Methane (Metan)
CNG	: Compressed Natural Gas (Sıkıştırılmış Doğalgaz)
CO	: Carbone Monoxide (Karbon Monoksit)
CO₂	: Carbone Dioxide (Karbondioksit)
COP	: Conference of the Parties (Taraflar Konferansı)
COPERT	: Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport
EPA	: Environmental Protection Agency (Çevre Koruma Ajansı)
F-Gazlar	: F Gases (Florlu Gazlar)
GAMS	: General Algebraic Modeling System
GCF	: Green Climate Fund (Yeşil İklim Fonu)
GSYİH	: Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
Gt	: Gigaton
GWP	: Global Warming Potential (Küresel Isınma Potansiyeli)
HFCs	: Hydrofluorocarbons (Hidroflorokarbonlar)
INDC	: Intended Nationally Determined Contribution
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change-
ITSECO	: Istanbul Transportation Sector Optimization
IVE	: International Vehicle Emissions
İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
İDO	: İstanbul Deniz Otobüsleri
İETT	: İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri
KGM	: Karayolu Genel Müdürlüğü
LEZ	: Low Emission Zones
LPG	: Liquefied Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)
LTO	: Landing and Take-Off
MOVES	: Motor Vehicle Emission Simulator
Mton	: Milyon ton
N₂O	: Dinitrogen Monoxide (Diazotmonoksit)
NDC	: Nationally Determined Contribution
NECS	: No Emission Control System
NIR	: National Inventory Report-Ulusal Envanter Raporu
NO_x	: Nitrogen Oxides (Azot Oksitler)
PFCs	: Perfluorocarbons (Perflorokarbonlar)
PJ	: Petajul
PM	: Particulate Matter (Partikül Madde)
RCP	: Representative Concentration Pathway

SF₆	: Sulphur Hexafluoride (Kükürt Hekzaflorür)
SGE	: Sera Gazı Emisyonu
SO₂	: Sulphur Dioxide (Kükürt Dioksit)
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
TIMES	: The Integrated MARKAL-EFOM System
TJ	: Terajul
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TWh	: Terawatt saat
UA	: Uluslararası
UNFCCC	: United Nations Framework Convention on Climate Change
VOC	: Volatile-Organic Carbon (Uçucu Organik Karbon)



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Sera gazları için küresel ısınma potansiyelleri.	7
Çizelge 3.1 : İstanbul raylı sistem ulaşım hat bilgileri.	34
Çizelge 6.1 : Ülkemizde gerçekleştirilen diğer çalışmalar.	73
Çizelge 7.2 : Kişi başı GSYİH verileri (TL ve cari fiyatlarla).	79
Çizelge 7.3 : İstanbul kişi başı GSYİH projeksiyonu.	80
Çizelge 7.4 : Toplam araç sayısı projeksiyonu.	81
Çizelge 7.5 : Türlerine göre motorlu kara taşıt sayısı projeksiyonu.	83
Çizelge 7.6 : Euro emisyon standartları için kabul edilen model yılları.	84
Çizelge 7.7 : Karayolu talep tahminleri, Bv-km.	86
Çizelge 7.8 : İstanbul ve Çanakkale Boğazları'ndan gemi geçiş verileri.	86
Çizelge 7.9 : Türkiye limanlarına uğrayan gemi sayısı.	87
Çizelge 7.10 : İstanbul'un gemi geçiş oranları.	87
Çizelge 7.11 : İstanbul denizyolu ulaşımı yolcu sayıları.	88
Çizelge 7.12 : İstanbul gemi geçiş ve denizyolu ulaşımı yolcu projeksiyonları.	89
Çizelge 7.13 : Türkiye denizyolu ulaşımı yakıt tüketimi, TJ.	89
Çizelge 7.14 : İstanbul denizyolu ulaşımı talep tahminleri, PJ.	90
Çizelge 7.15 : Havalimanlarına iniş-kalkış yapan uçak sayıları (1000 Adet).	91
Çizelge 7.16 : İstanbul uçuş sayısı projeksiyonu (Bin Adet).	91
Çizelge 7.17 : Türkiye havayolu ulaşımı yakıt tüketimi, TJ.	91
Çizelge 7.18 : İstanbul havayolu ulaşımı talep tahminleri, PJ.	92
Çizelge 7.19 : İstanbul raylı sistem yıllık yolcu sayısı (1000 yolcu).	92
Çizelge 7.20 : İstanbul demiryolu ulaşımı yolcu sayısı projeksiyonları.	93
Çizelge 7.21 : İstanbul demiryolu ulaşımı yıllık elektrik tüketimleri.	94
Çizelge 7.22 : İstanbul demiryolu ulaşımı talep tahminleri, PJ.	94
Çizelge 7.23 : Ulaşımda kullanılan yakıtların net kalori ve yoğunluk değerleri.	95
Çizelge 7.24 : Araçların ortalama yakıt tüketimi ve verimlilik değerleri.	96
Çizelge 7.25 : Modelde kullanılan emisyon faktörleri, kt/PJ.	97
Çizelge 7.26 : Karayolu araç türleri için modele girilen ortalama maliyet verileri.	98
Çizelge 7.27 : Demiryolu araç türleri için modele girilen ortalama maliyet verileri.	99
Çizelge 8.1 : Model çıktısı ve envanter verilerinin karşılaştırması.	105
Çizelge 8.2 : Baz senaryo yakıt tüketimleri, PJ/yıl.	107
Çizelge 8.3 : Karbon vergisi senaryoları yakıt tüketimleri, PJ/yıl.	110
Çizelge 8.4 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt tüketimleri, PJ/yıl.	127
Çizelge 8.5 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları yakıt tüketimleri, PJ/yıl.	114
Çizelge 8.6 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları yakıt tüketimleri, PJ/yıl.	120
Çizelge 8.7 : Toplu önlem senaryosu yakıt tüketimleri, PJ/yıl.	124
Çizelge 8.8 : Baz senaryo alt kategoriye göre SGE miktarı, Mton CO _{2e} /yıl.	136
Çizelge 8.9 : Karbon vergisi senaryoları SGE miktarı, Mton CO _{2e} /yıl.	138
Çizelge 8.10 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları SGE miktarı, Mton CO _{2e} /yıl.	144
Çizelge 8.11 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları SGE miktarı.	152
Çizelge 8.12 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları SGE miktarı, Mton CO _{2e} /yıl.	157

Çizelge 8.13 : Toplu önlem senaryosu yakıt tüketimleri, PJ/yıl.	162
Çizelge A.1 : TIMES-ITSECO modeli talep teknolojileri listesi	198
Çizelge B.1 : Detaylı nüfus verileri.	202
Çizelge B.2 : OECD'nin Türkiye GSYİH projeksiyonu.	203
Çizelge D.1 : İlk yatırım maliyetleri, Milyon \$ (UA Dahil değil).	216
Çizelge D.2 : İşletme ve bakım maliyetleri, Milyon \$ (UA Dahil değil).	217
Çizelge D.3 : İlk yatırım maliyetleri, Milyon \$ (UA Dahil).	218
Çizelge D.4 : İşletme ve bakım maliyetleri, Milyon \$ (UA Dahil değil).	219



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Yıllar itibariyle küresel yüzey sıcaklığının değişimi.....	4
Şekil 2.2 : Yıllar itibariyle atmosferik karbondioksit konsantrasyonunun değişimi. ..	5
Şekil 2.3 : RCP emisyon senaryo sonuçları.....	8
Şekil 2.4 : Küresel ortalama yüzey sıcaklığı değişimi.....	9
Şekil 2.5 : Farklı senaryolar altında küresel sera gazı emisyon hedefi açığı.	14
Şekil 2.6 : Yıllara göre toplam enerji arzının kaynaklar bazında dağılımı.	15
Şekil 2.7 : Türkiye birincil enerji arzının kaynaklar bazında dağılımı,2019.	16
Şekil 2.8 : Yıllara göre toplam nihai enerji tüketiminin kaynaklar bazında dağılımı	17
Şekil 2.9 : Türkiye birincil enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımı.	18
Şekil 2.10 : Ülkelerin toplam ve kişi başı sera gazı salımları.....	19
Şekil 2.11 : Türkiye'nin yıllara göre toplam sera gazı emisyonu.	20
Şekil 2.12 : Türkiye toplam sera gazı emisyonunun sektörlere göre dağılımı.	20
Şekil 3.1 : Karayolu seyir, yük ve yolcu taşımalarının yıllara göre değişimi.....	24
Şekil 3.2 : Türkiye motorlu kara taşıtı sayısının yıllara göre değişimi.....	24
Şekil 3.3 : Yıllar itibariyle ülkeler bazında binek otomobil sayısının değişimi.	25
Şekil 3.4 : Otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı.	26
Şekil 3.5 : Havayolu uçak sayısı, yük ve yolcu taşımalarının yıllara göre değişimi.	26
Şekil 3.6 : Denizyolu limanlara uğrayan ve boğazlardan geçen gemi sayısı.....	27
Şekil 3.7 : Demiryolu hat uzunluklarının yıllara göre değişimi.	27
Şekil 3.8 : İstanbul haritası.	28
Şekil 3.9 :Farklı illerin 2019 yılı nüfus, kişi başı GSYİH, yüzölçümü ve nüfus yoğunluğu karşılaştırması.....	29
Şekil 3.10 : İstanbul motorlu kara taşıtı sayısının yıllara göre değişimi.	30
Şekil 3.11 : 2019 yılı İstanbul'daki motorlu kara taşıtlarının türlerine göre dağılımı	31
Şekil 3.12 : İstanbul havayolu ulaşım istatistikleri.	32
Şekil 3.13 : İstanbul denizyolu ulaşım istatistikleri.	33
Şekil 3.14 : Günlük yolcu sayısının yolculuk türleri bazında dağılımı.	34
Şekil 3.15 : Raylı sistem hatlarının yıllara göre yolcu sayısı.	35
Şekil 3.16 : Deniz ulaşımı günlük yolcu sayılarının değişimi.	36
Şekil 3.17 : Ulaştırma sektörü sera gazı emisyonlarının yıllara göre değişimi.	37
Şekil 3.18 : 2019 yılı ulaştırma sektörü sera gazı dağılımı.....	38
Şekil 3.19 :Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımı sera gazı emisyonlarının yıllara göre değişimi.....	38
Şekil 5.1 : Enerji-ekonomi-çevre modellerinin sınıflandırılması.	54
Şekil 6.1 : TIMES Model yapısı.	61
Şekil 7.1 : Çalışmada ele alınan ulaştırma sektörü modları.....	76
Şekil 7.2 : TIMES-ITSECO referans enerji sistemi	77
Şekil 7.3 : Teknolojilerin kullandığı yakıt türleri.	78
Şekil 8.1 : Toplam emisyon sonuçlarının envanter ile karşılaştırılması.....	106

Şekil 8.2 :Baz senaryo yakıt türüne göre tüketimler (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.	108
Şekil 8.3 : Karbon vergisi senaryoları yakıt türüne göre tüketimler.....	111
Şekil 8.4 : Karbon vergisi senaryoları yakıt türüne göre tüketimler, UA dahil.	112
Şekil 8.5 :Karbon vergisi senaryoları yakıt tüketimi azaltım oranları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.	113
Şekil 8.6 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt türüne göre tüketimler.	129
Şekil 8.7 :Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt türüne göre tüketimler, UA dahil.....	131
Şekil 8.8 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt tüketimi azaltımları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.	133
Şekil 8.9 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları yakıt türüne göre tüketimler. ..	116
Şekil 8.10 :Verimlilik ve emisyon limit senaryoları yakıt türüne göre tüketimler, UA dahil.	118
Şekil 8.11 :Verimlilik ve emisyon limit senaryoları yakıt tüketimi azaltımları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.	119
Şekil 8.12 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları yakıt türüne göre tüketimler.	121
Şekil 8.13 :Hidrojen yakıtlı araç senaryoları yakıt türüne göre tüketimler, UA dahil	122
Şekil 8.14 :Hidrojen yakıtlı araç senaryoları yakıt tüketimi azaltımları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.	123
Şekil 8.15 : Toplu önlem senaryosu yakıt türüne göre tüketimler.....	125
Şekil 8.16 : Toplu önlem senaryosu yakıt türüne göre tüketimler, UA dahil.	125
Şekil 8.17 : Toplu önlem senaryosu yakıt tüketimi azaltımları.	126
Şekil 8.18 :Yakıt tüketimlerinin toplu karşılaştırması (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.....	134
Şekil 8.19 : Elektrikli araç senaryoları elektrik tüketimleri.	135
Şekil 8.20 :Baz senaryo yakıtı göre sera gazı emisyonları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.....	137
Şekil 8.21 : Karbon vergisi senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları. ...	140
Şekil 8.22 :Karbon vergisi senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.	141
Şekil 8.23 :Karbon vergisi senaryoları SGE azaltım oranları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.....	142
Şekil 8.24 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları.	146
Şekil 8.25 :Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.	148
Şekil 8.26 :Elektrikli ve hibrit araç senaryoları SGE azaltım oranları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.....	150
Şekil 8.27 :Verimlilik ve emisyon limit senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları.	153
Şekil 8.28 :Verimlilik ve emisyon limit senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.	155
Şekil 8.29 :Verimlilik ve emisyon limit senaryoları SGE azaltım oranları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.....	156
Şekil 8.30 : Hidrojen yakıtlı senaryoların yakıt türüne göre sera gazı emisyonları.	159
Şekil 8.31 :Hidrojen yakıtlı senaryoların yakıt türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.	160

Şekil 8.32 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları SGE azaltım oranları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.....	161
Şekil 8.33 : Toplu önlem senaryosu yakıt türüne göre sera gazı emisyonları.	163
Şekil 8.34 : Toplu önlem senaryosu yakıt türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.	164
Şekil 8.35 : Toplu önlem senaryosu SGE azaltım oranları.....	164
Şekil 8.36 : Sera gazı emisyonlarının toplu karşılaştırması (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.....	166
Şekil 8.37 : Elektrik üretimi kaynaklı sera gazı emisyonlarının emisyon azaltım oranlarına etkisi, (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.	169
Şekil 8.38 : NO _x emisyonları, (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.	171
Şekil 8.39 : CO emisyonları, (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.	172
Şekil 8.40 : SO ₂ emisyonları, (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.....	173
Şekil 8.41 : Uçucu organik bileşik emisyonları, (A):UA dahil değil, (B):UA dahil	174
Şekil 8.42 : PM emisyonları, (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.....	176
Şekil 8.43 : Alternatif senaryoların toplam maliyet değişimi (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.....	178
Şekil C.1 : Baz senaryo araç türüne göre sera gazı emisyonları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.....	204
Şekil C.2 : Karbon vergisi senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları.	205
Şekil C.3 : Karbon vergisi senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.	206
Şekil C.4 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları.	207
Şekil C.5 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.	209
Şekil C.6 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları.	211
Şekil C.7 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları	213
Şekil C.8 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.	212
Şekil C.9 : Hidrojen yakıtlı senaryoların araç türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.	214
Şekil C.10 : Toplu önlem senaryosu araç türüne göre sera gazı emisyonları.....	215
Şekil C.11 : Toplu önlem senaryosu araç türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.	215



İSTANBUL'DA ULAŞTIRMA SEKTÖRÜNÜN İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

İklim değışikliğı, günümüzde küresel ölçekteki en önemli problemlerden biri haline gelmiştir. İklim değışikliğinin temel sebebi olarak gösterilen küresel ısınma ise, atmosferde bulunan sera gazları (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs ve SF₆) tarafından dünyadan yansıtılan ışınların tutulması sonucu yerkürenin ısınması şeklinde tanımlanmaktadır. Sanayileşme öncesi dönemden bu yana, küresel ortalama yüzey sıcaklığı 1°C artış göstermiştir. Ayrıca, insan faaliyetleri günümüzdeki atmosferik CO₂ konsantrasyonunu sanayi devrimi öncesi seviyenin neredeyse %50 üzerine çıkarmıştır. İklim değışikliğinin olumsuz etkilerine karşı küresel düzeyde çözüm bulunabilmesi amacıyla çeşitli adımlar atılmaktadır. Bu doğrultuda, 2015 yılında 21. Taraflar Konferansı'nda kabul edilen ve küresel ısınmanın sanayi öncesi seviyelere kıyasla 2°C'nin çok altında, tercihen 1,5°C ile sınırlandırılmasını hedefleyen Paris Anlaşması küresel emisyonların en az % 55'ini oluşturan 55 ülkenin onayı ile 4 Kasım 2016'da yürürlüğe girmiştir. Tarihi Paris Anlaşması'nın kabul edildiğı COP21 öncesinde ülkeler, kendi yerel koşulları ve yeteneklerini dikkate alarak hazırladıkları sera gazı emisyonlarını azaltma isteklerini BMİDÇS Sekreteryası'na iletmıştır. Niyet Edilen Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkı olarak nitelendirilen bu iyi niyet beyanını ülkemiz 30 Eylül 2015 tarihinde Sekreteryaya'ya iletmış olup, sera gazı emisyonlarında 2030 yılında artıştan %21 oranında azaltım katkısı hedeflemiştir. Bu kapsamda, ulaştırma sektörü sera gazı salımına katkıda bulunan önemli bileşenlerden birini oluşturmaktadır.

Ülkemizde ulaştırma sektörü birincil enerji tüketimi 27,7 milyon TEP ile sektörel tüketimler arasında sanayi tüketiminden sonra ikinci sırada yer almaktadır. Ulaştırma sektörü birincil enerji tüketiminin yaklaşık %93'ünü karayolları oluşturmaktadır. Sera gazı salımına katkıda bulunan motorlu kara taşıtı sayısı ülkemizde gün geçtikçe artmaktadır. Türkiye'nin 2019 yılı motorlu kara taşıtı sayısı yaklaşık 23,2 milyon olup, bu değerin 4,2 milyonu İstanbul'daki araç sayısıdır. 5.461 km² ile ülke yüzölçümünün yalnızca %0,7'sini oluşturan İstanbul, küçük bir il olmasna rağmen nüfus ve ekonomik çıktı açısından ulusal olarak baskın bir rol oynamaktadır. İstanbul, 15,52 milyon nüfusu ve 15.285 ABD Dolar kişi başı gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH) değeri ile Türkiye'nin en büyük ve en gelişmiş metropol şehridir. Ayrıca, 2987 kişi/km² nüfus yoğunluğu ile zirvede yer almaktadır. İstanbul'da şehir içi ulaşım karayolu, raylı sistem ve denizyolu ile sağlanmaktadır. İstanbul Boğazı şehir içi ulaşımında olduğu kadar uluslararası ulaşımında da önemli bir rol oynamaktadır. İstanbul'un Anadolu ve Avrupa Yakası'nda toplamda 2 adet havalimanı bulunmaktadır.

Bu doğrultuda, bu çalışma kapsamında İstanbul'da ulaştırma sektörünün iklim değışikliğine olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Türkiye'de trafik yoğunluğunun en fazla olduğu şehirlerinden biri olan İstanbul için ulaştırma sektörü kaynaklı sera gazı emisyonlarının mevcut durum için hesaplanması, ileriye yönelik sera gazı emisyonu projeksiyonlarının yapılması ve farklı senaryolar altında gelecekte

sera gazı emisyonları üzerinde ne gibi etkiler olacağının değerlendirmesi yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) Modeli kullanılmıştır. TIMES uzun dönemde yerel, ulusal veya çok bölgeli bir enerji sistemindeki dinamiklerin tahmini için teknoloji açısından zengin bir temel sunan, ekonomik bir modeldir. Senaryo yaklaşımını ele alarak, farklı senaryolar altında enerji sektörünün gelecekteki olası durumunun araştırılmasına olanak sağlamaktadır. İstanbul için ulaştırma sektörünün iklim değişikliğine olan etkisinin değerlendirildiği bu çalışmada oluşturulan model, TIMES-ITSECO (İstanbul Transportation Sector Optimization-İstanbul Ulaştırma Sektörü Optimizasyonu) olarak adlandırılmıştır. TIMES-ITSECO modelindeki ulaştırma sektöründe 2016-2055 yılları için sera gazı salımı açısından en büyük paya sahip olan karayolu ulaşımına ek olarak kent içi raylı ulaşım, ulusal havayolu ve denizyolu ulaşımı ile uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımını içermektedir. Modelde sera gazı emisyonlarının yanı sıra diğer hava kirliliği parametreleri de yer almaktadır.

Çalışmada, mevcut durum senaryosuna (baz senaryo) ek olarak çeşitli azaltım senaryoları çalıştırılmış olup, yakıt tüketimi ve emisyon sonuçlarına ek olarak senaryoların maliyetleri belirlenmiştir. Karbon vergisi senaryoları; 2030 yılı itibarıyla emisyon maliyeti ton başına 5\$, 10\$ ve 20\$ olacak şekilde bir karbon vergisinin tanımlandığı CARBON_TAX_5, CARBON_TAX_10 ve CARBON_TAX_20 senaryolarını içermektedir. Elektrikli ve hibrit araç senaryoları; orta büyüme, yüksek büyüme ve çok yüksek büyüme oranlarına göre elektrikli ve hibrit otomobillerin ele alındığı ELC_HYB_MEDIUM, ELC_HYB_HIGH ve ELC_HYB_VERY-HIGH senaryolarını, dizel ve benzinli otomobillerin 2030 yılı itibarıyla satışının yasaklandığı FOSSIL_BAN senaryosunu ve İstanbul için planlanmış olan demiryolu ağlarının modele dahil edildiği ELC_RAILWAY senaryosunu içermektedir. EFFICIENCY senaryosunda 2055 yılına kadar karayolu ulaşımı teknolojilerine ait verimlilik değerlerinde %15 artışın emisyon salımı üzerine olan etkileri değerlendirilmiştir. Emisyon limit senaryoları; baz senaryoya oranla artış üzerinden 2055 yılında %10, %30 ve %50 sera gazı emisyon azaltımı olacak şekilde bir emisyon sınırının koyulduğu EMS_LIMIT_10, EMS_LIMIT_30 ve EMS_LIMIT_50 senaryolarını içermektedir. Hidrojen yakıtlı araç senaryoları ise; 2035 yılı itibarıyla hidrojen yakıtlı uçak, otomobil, otobüs ve kamyon teknolojilerinin 2055 yılına kadar kendi sınıflarında talebin %10, %20 ve %30'unu karşıladıkları HYDROGEN_10, HYDROGEN_20 ve HYDROGEN_30 senaryolarını içermektedir. Ayrıca, EFFICIENCY, ELC_RAILWAY, ELC_HYB_HIGH, FOSSIL BAN ve HYDROGEN-20 senaryoları SUPER_SCENARIO'da toplu olarak ele alınmıştır. Tüm sonuçlar uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil olduğu ve olmadığı durumlar için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Mevcut plan ve politikaların sürdürüldüğü, emisyon azaltımına yönelik yeni önlemlerinin alınmadığı ve mevcut eğilimin devam ettiği baz senaryonun 2016 yılı toplam yakıt tüketimi, uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil olmadığı durum için 167 PJ, dahil olduğu durum için 298 PJ'dür. Bu değerler 2055 yılında sırasıyla 533 PJ ve 935 PJ'e yükselmiştir. Yine baz senaryo sera gazı emisyon sonuçları 2016 yılı için uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil olmadığı durum için 12,3 Mton CO_{2e}, dahil olduğu durum için 21,8 Mton CO_{2e} olarak elde edilmiştir. Bu değerler 2055 yılında sırasıyla 39,3 Mton CO_{2e} ve 68,2 Mton CO_{2e}'ye yükselmiştir.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımı toplam tüketim içerisine dahil edilmediğinde 2055 yılında baz senaryoya oranla sırasıyla yakıt tüketiminde meydana

gelen değişimler; CARBON_TAX_5 için %12, CARBON_TAX_10 için %14, CARBON_TAX_20 için %16, ELC_HYB_MEDIUM için %3,1, ELC_HYB_HIGH için %7,6, ELC_HYB_VERY-HIGH için %12,6, FOSSIL_BAN için %15,1, EFFICIENCY için %11, EMS_LIMIT_10 için %0,9, EMS_LIMIT_30 için %0,2, EMS_LIMIT_50 için %3,5, HYDROGEN_10, HYDROGEN_20 ve HYDROGEN_30 için yaklaşık %1 ve SUPER_SCENARIO için %28 oranında azalma şeklindedir. Toplam sera gazı emisyonunda meydana gelen değişim ise CARBON_TAX_5 için %13,6, CARBON_TAX_10 için %15, CARBON_TAX_20 için %16,3, ELC_HYB_MEDIUM için %4,7, ELC_HYB_HIGH için %11,5, ELC_HYB_VERY-HIGH için %21, FOSSIL_BAN için %23,6, ELC_RAILWAY için %0,1, EFFICIENCY için %11,3, EMS_LIMIT_10 için %12, EMS_LIMIT_30 için %12,3, EMS_LIMIT_50 için %16,8, HYDROGEN_10 için 6,3, HYDROGEN_20 için %12,7, HYDROGEN_30 için %19,1 ve SUPER_SCENARIO için %42,6 oranında azalma şeklindedir. Toplu önlem senaryosunda NO_x emisyonlarında %30, CO emisyonlarında %24, SO₂ emisyonlarında %5, uçucu organik karbon emisyonlarında %19 ve partikül madde emisyonlarında %21 azaltım sağlanmıştır.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımı toplam tüketim içerisinde dahil edildiğinde 2055 yılında baz senaryoya oranla sırasıyla yakıt tüketiminde meydana gelen değişimler; CARBON_TAX_5 için %7, CARBON_TAX_10 için %8, CARBON_TAX_20 için %9, ELC_HYB_MEDIUM için %1,7, ELC_HYB_HIGH için %4,3, ELC_HYB_VERY-HIGH için %7,2, FOSSIL_BAN için %8,6, EFFICIENCY için %6,4, EMS_LIMIT_10 için %0,5, EMS_LIMIT_30 için %0,1, EMS_LIMIT_50 için %2, HYDROGEN_10 için %7,5, HYDROGEN_20 için %15,3, HYDROGEN_30 için %23,1 ve SUPER_SCENARIO için %15,6 oranında azalma şeklindedir. Toplam sera gazı emisyonunda meydana gelen değişim ise CARBON_TAX_5 için %7,8, CARBON_TAX_10 için %8,6, CARBON_TAX_20 için %9,5, ELC_HYB_MEDIUM için %2,7, ELC_HYB_HIGH için %6,6, ELC_HYB_VERY-HIGH için %12,1, FOSSIL_BAN için %13,6, ELC_RAILWAY için %0,1, EFFICIENCY için %6,5, EMS_LIMIT_10 için %10, EMS_LIMIT_30 için %30, EMS_LIMIT_50 için %50, HYDROGEN_10 için %7,4, HYDROGEN_20 için %15,1, HYDROGEN_30 için %22,8 ve SUPER_SCENARIO için %32,3 oranında azalma şeklindedir. Toplu önlem senaryosunda NO_x emisyonlarında %23, CO emisyonlarında %21, SO₂ emisyonlarında %8, uçucu organik karbon emisyonlarında %19 ve partikül madde emisyonlarında %11 azaltım sağlanmıştır.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda, işletme ve bakım maliyetleri ilk yatırım maliyetlerinin yaklaşık %13-%17'sini, dahil edildiği durumda ise %13-%19'unu oluşturmaktadır. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda en yüksek emisyon azaltımının elde edildiği toplu önlem senaryosunda baz senaryoya oranla toplam maliyette yaklaşık %49 oranında artış olmuştur. Bu senaryoda, sera gazı azaltım maliyeti 2025 yılında 16,6 M\$/kton CO_{2e}'den 2055 yılında 1,6 M\$/kton CO_{2e}'ye düşmüştür. Öte yandan uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda 2055 yılına gelindiğinde toplu önlem senaryosunda baz senaryoya oranla, ilk yatırım maliyetleri ile işletme ve bakım maliyetlerini içeren toplam maliyette yaklaşık %33 oranında artış olmuştur. Bu senaryoda, sera gazı azaltım maliyeti 2025 yılında 16,6 M\$/kton CO_{2e}'den 2055 yılında 1,2 M\$/kton CO_{2e}'ye düşmüştür.



DETERMINING THE IMPACT OF THE TRANSPORTATION SECTOR ON CLIMATE CHANGE IN ISTANBUL

SUMMARY

Climate change has become one of the most important problems on a global scale in recent years. In the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), climate change is defined as “a change in climate as a result of human activities that directly or indirectly alter the composition of the global atmosphere, in addition to natural climate change observed in comparable time periods”. Global warming, which is shown as the main cause of climate change, is defined as an increase in the surface temperature of the earth due to the greenhouse gases such as carbon dioxide, methane, nitrous monoxide, hydrofluorocarbons, perfluorocarbons and sulfur hexafluoride in the atmosphere. The global average surface temperature has increased by 1°C since the pre-industrial period. Furthermore, human activities have increased the present atmospheric CO₂ concentration to almost 50% above pre-industrial levels. The concentration, which was measured as 280 ppm in 1850, reached 416 ppm in 2021.

Determination of the future effects of climate change has great importance for identification of sectoral vulnerabilities, planning resources, and determining the course of mitigation and adaptation studies. In this context, modeling studies play a guiding role. As stated in the climate projections developed for Turkey by the Turkish State Meteorological Service, annual average temperatures are expected to increase by 1.5-2.6°C on average according to the RCP4.5 scenario, and between 2.5-3.7°C according to the RCP8.5 scenario.

Various efforts are being taken to find a solution at the global level against the negative effects of climate change. In this respect, the Paris Agreement, which aims to limit GHG emissions, was accepted at the 21st Climate Change Conference of the Parties held in Paris in November 2015, and entered into force in November 2016. One of the most important articles of the Paris Agreement is to keep the global average temperature increase well below pre-industrial levels of 2°C and to continue efforts to limit the temperature increase to 1.5°C of pre-industrial levels. In this context, countries have submitted their intended nationally determined contributions (INDCs) to the UNFCCC Secretariat, which they have committed to reduce their GHG emissions prior to the Paris Climate Summit. Turkey also prepared the INDC and submitted to the UNFCCC secretariat on 30 September 2015. Turkey aims to 21% reduction in GHG emissions from the business as usual scenario level by 2030 with the implementation of plans and policies in the energy, industry, transport, buildings and urban transformation, agriculture and forestry. At this point, it is expected that the prediction of global greenhouse gas emissions on the basis of quantity will provide important information to decision makers in terms of mitigation measures to be taken. In this sense, the transportation sector constitutes one of the important components contributing to greenhouse gas emissions.

In Turkey, the primary energy consumption of the transportation sector is 27.7 million TOE, and it ranks second among the sectoral consumptions after the total industry consumption. Road transportation constitute approximately 93% of the primary energy consumption of the transportation sector. The number of motor vehicles in Turkey in 2019 is approximately 23.2 million, of which 4.2 million is the number of vehicles in Istanbul.

Istanbul which constitutes only 0.7% of the country's surface area with 5,461 km², plays a nationally dominant role in terms of population and economic output, despite being a small province. Istanbul is the largest and most developed metropolitan city of Turkey with a 15.52 million human population and a gross domestic product (GDP) per capita of US\$ 15.285. Moreover, it is at the top with a population density of 2987 people/km². Urban transportation in Istanbul is provided by road, railway and water-borne navigation. The Bosphorus plays an important role in international transportation as well as in urban transportation. There are 2 airports in total on the Anatolian and European Sides of Istanbul, and due to the city's strategic location, it serves as one of the most important aviation centers in the world.

In the current study, it is aimed to examine the impact of the transportation sector on climate change in Istanbul. Calculation of greenhouse gas emissions originating from the transportation sector for Istanbul for the current situation, making future greenhouse gas emission projections and the effects of future greenhouse gas emissions under different scenarios were evaluated.

TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) Model was used within the scope of the thesis study. TIMES is an economic model that provides a technology-rich basis for predicting long-term dynamics in a local, national or multi-regional energy system. By taking the scenario approach, it allows to investigate the possible future situation of the energy sector under different scenarios. The model created in this study, in which the impact of the transportation sector on climate change for Istanbul is evaluated, is named TIMES-ITSECO (Istanbul Transportation Sector Optimization). The transportation sector in the TIMES-ITSECO model deals with urban railway, national and international aviation and water-borne navigation, in addition to road transportation, which has the largest share in terms of greenhouse gas emissions for the years 2016-2055. The model includes greenhouse gas emissions that are carbon dioxide, methane and nitrous oxide, as well as other air pollution parameters such as carbon monoxide, nitrogen oxides, sulfur oxides, particulate matter and volatile organic carbons.

In this study, carbon tax scenarios, electric and hybrid vehicle scenarios, emission limit scenarios, efficiency scenario, hydrogen vehicle scenarios and collective action scenario were run compared to the reference scenario (baseline scenario). In addition to the fuel consumption and emission results, the costs of the scenarios were determined. Carbon tax scenarios include the scenarios CARBON_TAX_5, CARBON_TAX_10 and CARBON_TAX_20 where a carbon tax is defined with emission costs of \$5, \$10 and \$20 per ton by 2030. Electric and hybrid vehicle scenarios include ELC_HYB_MEDIUM, ELC_HYB_HIGH and ELC_HYB_VERY-HIGH scenarios in which electric and hybrid cars are discussed according to medium growth, high growth and very high growth rates, FOSSIL_BAN scenario where the sale of diesel and gasoline cars is prohibited by 2030 and ELC_RAILWAY scenario where the railway networks planned for Istanbul. In the EFFICIENCY scenario, the effects of a 15% increase in the efficiency values of road transport technologies until

2055 on emissions were evaluated. Emission limit scenarios include EMS_LIMIT_10, EMS_LIMIT_30 and EMS_LIMIT_50 scenarios where an emission limit is set as 10%, 30% and 50% greenhouse gas emission reduction in 2055, based on an increase compared to the base scenario. The hydrogen vehicle scenarios include HYDROGEN_10, HYDROGEN_20 and HYDROGEN_30 scenarios, where hydrogen fueled aircraft, automobile, bus and truck technologies meet 10%, 20% and 30% of the demand in their classes until 2055 as of 2035. In addition, EFFICIENCY, ELC_RAILWAY, ELC_HYB_HIGH, FOSSIL BAN and HYDROGEN-20 scenarios are discussed collectively in SUPER_SCENARIO. All results were evaluated separately for the cases with and without international aviation and water-borne navigation.

In the baseline scenario where current plans and policies are maintained, new measures for emission reduction are not taken and the current trend continues, the total fuel consumption in 2016 is 167 PJ for the case that does not include international aviation and water-borne navigation, and 298 PJ for the case where they are included. These values increased to 533 PJ and 935 PJ in 2055, respectively. Moreover, the GHG emission results of the baseline scenario are 12.3 Mtons CO₂eq for the case without international aviation and water-borne navigation for 2016 and 21.8 Mtons CO₂eq for the case where it is included. These values have increased to 39.3 Mtons CO₂eq and 68.2 Mtons CO₂eq respectively in 2055.

When international aviation and water-borne navigation are included in the total consumption, the reductions in fuel consumption in 2055 compared to the baseline scenario, respectively, are as follows: 12% for CARBON_TAX_5, 14% for CARBON_TAX_10, 16% for CARBON_TAX_20, 3.1% for ELC_HYB_MEDIUM, 7.6% for ELC_HYB_HIGH, 12.6% for ELC_HYB_VERY-HIGH, 15.1% for FOSSIL_BAN, 11% for EFFICIENCY, 0.9% for EMS_LIMIT_10, 0.2% for EMS_LIMIT_30, 3.5% for EMS_LIMIT_50, approximately 1% for HYDROGEN_10, HYDROGEN_20 and HYDROGEN_30 and 28% for SUPER_SCENARIO. The reduction values in total greenhouse gas emissions are as follows: 13.6% for CARBON_TAX_5, 15% for CARBON_TAX_10, 16.3% for CARBON_TAX_20, 4.7% for ELC_HYB_MEDIUM, 11.5% for ELC_HYB_HIGH, 21% for ELC_HYB_VERY-HIGH, 23.6% for FOSSIL_BAN, 0.1% for ELC_RAILWAY, 11.3% for EFFICIENCY, 12% for EMS_LIMIT_10, 12.3% for EMS_LIMIT_30, 16.8% for EMS_LIMIT_50, 6.3% for HYDROGEN_10, 12.7% for HYDROGEN_20, 19.1% for HYDROGEN_30 and 42.6% for SUPER_SCENARIO. In the collective action scenario, the reduction rates achieved in air pollution parameters are 30% in NO_x emissions, 24% in CO emissions, 5% in SO₂ emissions, 19% in volatile organic carbon emissions and 21% in particulate matter emissions.

When international aviation and water-borne navigation are included in the total consumption, the reductions in fuel consumption in 2055 compared to the baseline scenario, respectively, are as follows: 7% for CARBON_TAX_5, 8% for CARBON_TAX_10, 9% for CARBON_TAX_20, 1.7% for ELC_HYB_MEDIUM, 4.3% for ELC_HYB_HIGH, 7.2% for ELC_HYB_VERY-HIGH, 8.6% for FOSSIL_BAN, 6.4% for EFFICIENCY, 0.5% for EMS_LIMIT_10, 0.1% for EMS_LIMIT_30, 2% for EMS_LIMIT_50, 7.5% for HYDROGEN_10, 15.3% for HYDROGEN_20, 23.1% for HYDROGEN_30 and 15.6% for SUPER_SCENARIO. The reduction values in total greenhouse gas emissions are as follows: 7.8% for CARBON_TAX_5, 8.6% for CARBON_TAX_10, 9.5% for CARBON_TAX_20, 2.7% for ELC_HYB_MEDIUM, 6.6% for ELC_HYB_HIGH, 12.1% for

ELC_HYB_VERY-HIGH, for 13.6% FOSSIL_BAN, 0.1% for ELC_RAILWAY, 6.5% for EFFICIENCY, 10% for EMS_LIMIT_10, 30% for EMS_LIMIT_30, 50% for EMS_LIMIT_50, 7.4% for HYDROGEN_10 15.1% for HYDROGEN_20, 22.8% for HYDROGEN_30, and 32.3% for SUPER_SCENARIO. In the collective action scenario (SUPER_SCENARIO), the reduction rates achieved in air pollution parameters are 23% in NO_x emissions, 21% in CO emissions, 8% in SO₂ emissions, 19% in volatile organic carbon emissions and 11% in particulate matter emissions.

In the case that international aviation and water-borne navigation are not included in the results, operation and maintenance costs constitute approximately 13%-17% of the investment costs, and 13%-19% in the case where they are included. In SUPER_SCENARIO, where the highest emission reduction was achieved in the first case, there was an increase of about 49% in the total cost compared to the baseline scenario. In this scenario, the greenhouse gas abatement cost decreased from 16.6 M\$/kton CO₂eq in 2025 to 1.6 M\$/kton CO₂eq in 2055. On the other hand, considering the results of international aviation and water-borne navigation as well, there has been an increase of approximately 33% in the total cost of SUPER_SCENARIO compared to the baseline scenario. In this scenario, the greenhouse gas abatement cost decreased from 16.6 M\$/kton CO₂eq in 2025 to 1.2 M\$/kton CO₂eq in 2055.

1. GİRİŞ

Günümüzde küresel ölçekteki en önemli problemlerden biri iklim değişikliği olup; son yıllarda kuraklık ve çölleşme, yağış rejiminde anormal değişimler ve aşırı hava olayları, orman yangınlarında artış ve buzulların erimesi gibi iklim değişikliğinin sonucu olarak meydana gelen olaylardaki artış dikkat çekmektedir. Bu sebeple, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı küresel düzeyde çözüm bulunabilmesi amacıyla çeşitli adımlar atılmakta, ülkeler sera gazı emisyon azaltım hedeflerini belirlemekte ve aynı zamanda iklim değişikliğine uyum çalışmaları hız kazanmaktadır.

Sera gazı salımlarının azaltılmasına katkı sağlayacak en önemli bileşenlerden birini ulaştırma sektörü oluşturmaktadır. Ülkemizde ulaştırma sektörü gün geçtikçe gelişim göstermekte, ulaşım talebindeki artışa bağlı olarak sera gazı emisyonları da gün geçtikçe artmaktadır. İstanbul, Türkiye'nin en büyük ve kalabalık şehri ve dünyadaki belli başlı mega kentlerden biridir.

Bu doğrultuda, bu çalışma kapsamında İstanbul'da ulaştırma sektörünün iklim değişikliğine olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Türkiye'de trafik yoğunluğunun en fazla olduğu şehirlerinden biri olan İstanbul için ulaştırma sektörü kaynaklı sera gazı emisyonlarının mevcut durum için hesaplanması ve ileriye yönelik sera gazı emisyonu projeksiyonlarının yapılmasının yanı sıra, farklı senaryolar oluşturulması ve bu senaryoların gelecekte sera gazı emisyonları üzerinde ne gibi etkileri olacağının değerlendirmesi yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) Modeli kullanılmış olup, sera gazı salımı açısından en büyük paya sahip olan karayolu ulaşımına ek olarak kent içi raylı ulaşım, ulusal havayolu ve denizyolu ulaşımı ile uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımı ele alınmıştır. Çalışma kapsamında temel olarak;

- Ulaştırma sektörü, yapılan çalışmalar ve kullanılan modellere ilişkin kapsamlı literatür taraması,
- Oluşturulacak referans senaryoya girdi sağlayacak verilerin toplanması,
- Talep tahminleri ve alternatif teknolojilere yönelik verilerin üretilmesi,

- Referans senaryonun çalıştırılması ve baz yıl kalibrasyonunun yapılması,
- Alternatif senaryoların belirlenmesi,
- Alternatif senaryoların çalıştırılması, sonuçların derlenmesi ve yorumlanması

iş adımıları gerçekleştirilmiştir.

Ulaştırma sektörüne yönelik yapılacak çalışmalar ve alınacak önlemlerin sera gazı azaltımına büyük katkı sağlayacağı ve sera gazı azaltım hedeflerinin gerçekleştirilmesinde önemli bir rol oynayacağı dşnlmektedir. Ayrıca, ulaştırma sektörü bazında İstanbul için böyle bir çalışmanın yürütülmesinin, ülkemiz açısından önemli çıktılar oluşturması ve yapılacak diğer benzer çalışmalara yol göstermesi beklenmektedir.

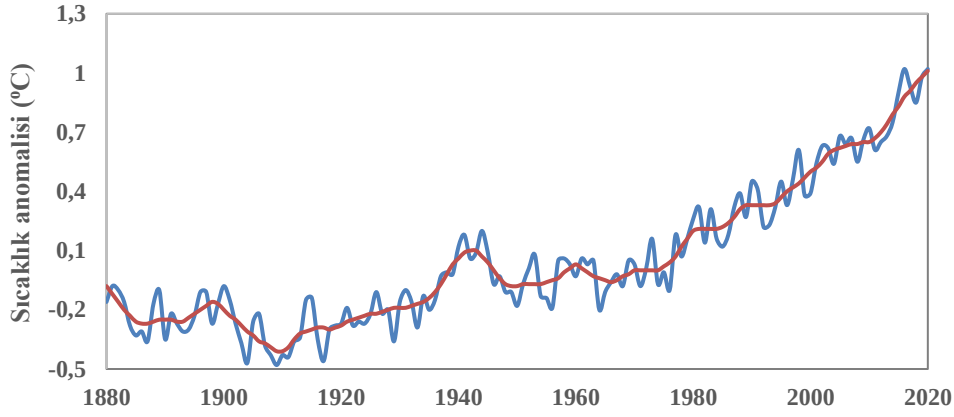


2. KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

2.1 İklim Değişikliği ve Küresel Isınma

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS)’inde iklim değişikliği, “karşılaştırılabilir zaman dilimlerinde gözlenen doğal iklim değişikliğine ek olarak, doğrudan veya dolaylı olarak küresel atmosferin bileşimini bozan insan faaliyetleri sonucunda iklimde oluşan değişiklik” olarak ifade edilmektedir (UNFCCC, 1992). Küresel kara ve okyanus sıcaklığındaki artış, yükselen deniz seviyeleri, buzulların erimesi, kasırgalar, sıcak hava dalgaları, orman yangınları, kuraklık, seller, şiddetli yağışlar gibi aşırı hava olaylarındaki artış, bitki örtüsündeki değişiklikler iklim değişikliği temel göstergelerine ilişkin kanıt sayılmaktadır. Güneşten gelen radyasyon oranının değişmesine bağlı olarak küresel sıcaklığın artması, dünyanın prezisyon etkisi ve El Nino hareketi gibi etkenler iklim değişikliğinin doğal sebeplerini, hızlı nüfus artışı, tüketim eğiliminin artması, sanayileşme, enerji üretimi ve fosil yakıtların kullanılması gibi etkenler ise antropojenik sebepleri oluşturmaktadır.

İklim değişikliğinin temel sebebi olarak gösterilen küresel ısınma, atmosferde bulunan sera gazları tarafından güneşten gelen ışınların dünya tarafından yansıtılan kısımlarının tutulması sonucu yerkürenin ısınması şeklinde tanımlanmaktadır. Özellikle fosil yakıtların yanması nedeniyle sanayi öncesi dönemden beri Dünya'nın iklim sisteminin uzun vadeli ısınması gözlemlenmekte ve bu ısınma yaygın olarak küresel yüzey sıcaklığındaki artış olarak ölçülmektedir. Küresel yüzey sıcaklığındaki değişim Şekil 2.1’de gösterilmektedir (NASA, 2021).



Şekil 2.1 : Yıllar itibariyle küresel yüzey sıcaklığının değişimi (NASA, 2021).

Sanayileşme öncesi dönemden bu yana, küresel ortalama yüzey sıcaklığı 1°C artış göstermiştir. Bu sayı her 10 yılda 0,2 artış göstermektedir ve insan faaliyetleri sonucu mevcut ısınma eğilimi görülmemiş bir hızda ilerlemektedir.

2.1.1 Sera gazları ve özellikleri

Sera gazı, dünya yüzeyinden yayılan kızılötesi radyasyonu absorbe ederek tekrar dünya yüzeyine yayma özelliği ile sera etkisine katkıda bulunan gazlardır. Sera gazları atmosferde bulunan tüm gazların sadece belirli bir kısmını oluşturmalarına rağmen, dünyanın enerji bütçesi üzerinde önemli etkiye sahip olmaktadır. Sera gazı konsantrasyonlarında tarih boyunca meydana gelen değişimler, çeşitli zamanlarda önemli iklim değişikliği etkilerine yol açmıştır. Genel olarak, sera gazı konsantrasyonlarının özellikle sıcak dönemlerde daha yüksek ve soğuk dönemlerde daha düşük olduğu bilinmektedir.

Her bir sera gazının iklim üzerindeki etkisi kimyasal doğasına ve atmosferdeki konsantrasyonuna bağlıdır. Bazı gazlar, kızılötesi radyasyonu absorbe etme konusunda yüksek kapasiteye sahiptir veya yüksek miktarlarda atmosfere salınmaktadır; öte yandan, diğerleri önemli ölçüde daha düşük absorpsiyon kapasitelerine sahiptir veya eser miktarlarda atmosfere salınmaktadır (Mann, 2021).

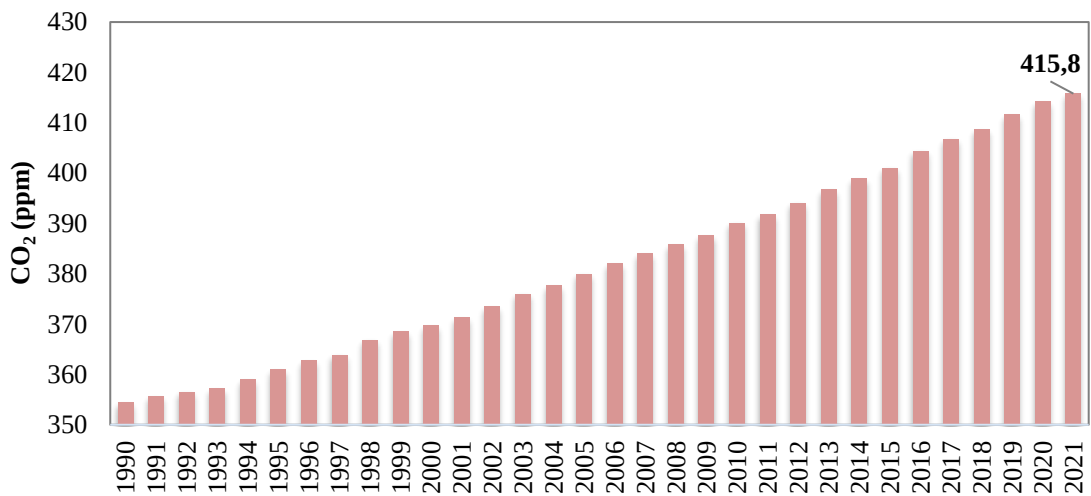
Su buharı (H_2O), karbondioksit (CO_2), ozon (O_3), metan (CH_4), diazotmonoksit (N_2O) gibi bazı sera gazları insan faaliyetleri sonucu veya doğal olarak oluşabilirken, F-Gazlar (Florlu gazlar) olarak gruplandırılan hidroflorokarbonlar (HFCs), perflorokarbonlar (PFCs) ve kükürt hekzaflorid (SF_6) gibi sera gazları tamamen insan faaliyetleri sonucu oluşmaktadır. Ayrıca, atmosferde karbonmonoksit (CO),

azotdioksit (NO_2), kükürtdioksit (SO_2), ozon (O_3), uçucu organik bileşikler (VOCs) ve nitrojen oksitler (NO_x) gibi hava kirletici gazlar da bulunmaktadır ancak, bu gazların doğrudan ısımaya etki ettikleri kabul edilmemiştir (Pekin, 2006).

Kyoto Protokolü'nde tanımlanan başlıca sera gazları karbondioksit (CO_2), metan (CH_4) diazotmonoksit (N_2O), hidroflorokarbonlar (HFCs), perfluorokarbonlar (PFCs) ve kükürt heksaflorür (SF_6) olup, bu gazlar aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

Karbondioksit (CO_2): En önemli sera gazı olan CO_2 , küresel karbon döngüsünün bir parçası olarak doğal şekilde oluşmakta; ancak insan faaliyetleri, fosil yakıtların ve diğer kaynakların yakılması yoluyla atmosferik CO_2 yükünü arttırmaktadır. CO_2 emisyonları, okyanuslar ve karasal bitki örtüsü gibi doğal yutaklar tarafından bir dizi fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler ile dengelenmekte olup, ormansızlaşma vb. insan faaliyetleri bu süreçleri bozabilmektedir. Sonuç olarak atmosferde birikim olmakta ve atmosferik CO_2 miktarı gün geçtikçe giderek artmaktadır (EPA, 2021; Mann, 2021).

İnsan faaliyetleri, günümüzdeki atmosferik CO_2 konsantrasyonunu sanayi devrimi öncesi seviyenin neredeyse %50 üzerine çıkarmıştır. 1850 yılında 280 ppm olarak ölçülen konsantrasyon 2021 yılında 416 ppm seviyesine ulaşmıştır. Yıllar itibarıyla atmosferik CO_2 konsantrasyonunda meydana gelen değişim Şekil 2.2'de görülmektedir (NASA, 2021). İklim değişikliği açısından güvenli sınır olduğu bilinen 350 ppm çoktan aşılmış durumdadır.



Şekil 2.2 : Yıllar itibarıyla atmosferik karbondioksit konsantrasyonunun değişimi (NASA, 2021).

Metan (CH_4): İkinci en önemli sera gazı olan CH_4 , sulak alanlar gibi doğal kaynakların yanı sıra kömür madenciliği, doğalgaz üretimi ve dağıtımı, çöp sahalarında atıkların ayrışması, hayvancılık ve tarımsal faaliyetler gibi antropojenik kaynaklardan atmosfere salınmaktadır. Antropojenik CH_4 emisyon miktarı yıllık toplam emisyonun %70'ini oluşturmaktadır (Mann, 2021). Günümüzde atmosferdeki CH_4 birikimi sanayi öncesi döneme göre 2,5 kat daha yüksektir ve her yıl yaklaşık %1 oranında artış göstermektedir (ÇŞB, 2021).

Diazotmonoksit/Nitröz oksit (N_2O): Azot oksitlerden olan N_2O , tarımsal arazilerde sentetik ve doğal gübre kullanımı ve endüstriyel faaliyetler ile atıksuların arıtılması, katı atıkların ve fosil yakıtların yakılması sırasında açığa çıkmaktadır (EPA, 2021). Atmosferdeki fotokimyasal bozulmalar N_2O için ana yutaktır. Günümüzde atmosferdeki N_2O birikimi sanayi öncesi döneme göre yaklaşık %17 daha yüksektir (ÇŞB, 2021).

Florlu gazlar: Florlu gazlar (F-Gazlar), çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan insan yapımı gazlar ailesi olup, hidrofluorokarbonlar (HFCs), perfluorokarbonlar (PFCs) ve kükürt heksaflorür (SF_6) olarak sınıflandırılmaktadır. F-gazlarının ozon tahribat potansiyelleri sıfır olduğundan ozon tabakasına zarar vermezler ancak, küresel ısınma etkileri yüksek olan güçlü sera gazlarıdır ve iklim değişikliğine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadırlar (EC, 2021).

2.1.2 Küresel ısınma potansiyeli

Sera gazlarının atmosferde ısı tutma kabiliyetleri farklılık göstermekte olup, bütün sera gazları, kendilerinin CO_2 'ye oranla ısı tutma kabiliyetlerini nitelendiren bir "Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)"ne sahiptir. Küresel ısınma potansiyeli, farklı gazların küresel ısınma etkilerinin karşılaştırılmasına olanak sağlamak için geliştirilmiştir. GWP ne kadar büyükse, belirli bir gaz o zaman periyodu boyunca CO_2 'ye kıyasla dünyayı o kadar fazla ısıtmakta olup, genellikle GWP'ler için kullanılan süre 100 yıldır. GWP'ler, farklı gazların emisyon tahminlerinin gerçekleştirilmesine, politika yapıcılar tarafından sektörler ve gazlar arasında emisyon azaltma fırsatlarının karşılaştırılmasına olanak tanıyan ortak bir ölçü birimi sağlamaktadır. Küresel ısınma potansiyelleri kullanılarak, sera gazı emisyonları karbondioksit eşdeğeri (CO_2e) olarak hesaplanmaktadır (EPA, 2021). Sera gazlarının 100 yıllık küresel ısınma potansiyelleri Çizelge 2.1'de verilmiştir (IPCC, 1996, 2007, 2013).

Çizelge 2.1 : Sera gazları için küresel ısınma potansiyelleri (IPCC, 1996, 2007, 2013).

Kimyasal formül	Atmosfer Ömrü (yıl)*	100 yıllık GWP değerleri		
		2. Araştırma Raporu (SAR)	4. Araştırma Raporu (AR4)	5. Araştırma Raporu (AR5)
Karbondioksit (CO ₂)	50-200	1	1	1
Metan (CH ₄)	12	21	25	28
Nitröz oksit (N ₂ O)	114	310	298	265
PFC-14 (CF ₄)	50.000	6.500	7.390	6.630
PFC-116 (C ₂ F ₆)	10.000	9.200	12.200	11.100
HFC-23 (CHF ₃)	270	11.700	14.800	12.400
Kükürt heksaflorür (SF ₆)	3.200	23.900	22.800	23.500

Florlu sera gazları için en yüksek değere sahip gaz örnek olarak verilmiştir. Detaylı tabloya kaynaklardan ulaşılabilir.

*: 4.Araştırma Raporu'nda yer alan değerlerdir.

Mevcut durumda Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri hesaplamalarında 4.Araştırma Raporu değerleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda, metan karbondioksit'e kıyasla 25 kat, diazotmonoksit ise 298 kat daha fazla ısı tutma özelliğine sahiptir. Florlu gazlar ise hem küresel ısınma potansiyelleri hem de atmosferik ömürleri açısından karbondioksit, metan ve diazot monoksit'e göre oldukça yüksek değerlere sahiptir.

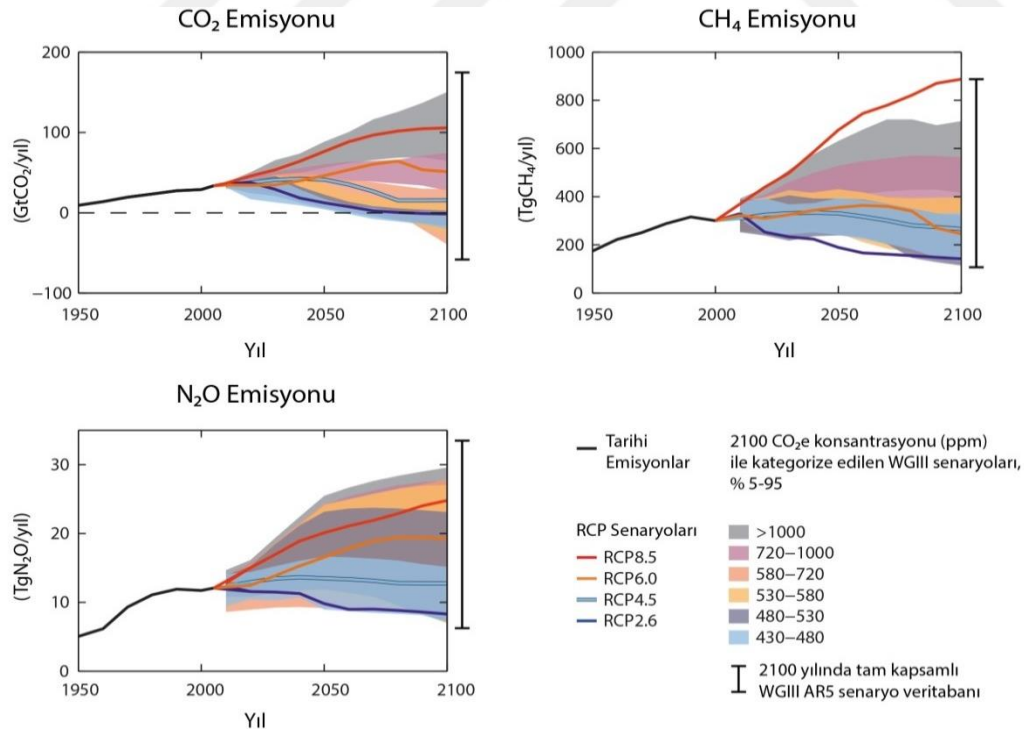
2.1.3 Gelecekteki iklim öngörülleri

Sera gazı emisyon salımlarının devam etmesi sonucu iklim sisteminin tüm bileşenlerinde daha fazla ısınma ve uzun süreli değişiklikler meydana gelecek olup, insanlar ve ekosistemler için ciddi, yaygın ve geri döndürülemez etkilerin olma ihtimali artacaktır. İklim değişikliğinin sınırlandırılması için uyum ile birlikte sürdürülebilir bir sera gazı emisyon azaltımı gerekmektedir (IPCC, 2014).

İklim değişikliğinin gelecekteki etkilerinin belirlenmesi, sektörel kırılganlıkların tespit edilmesi, kaynakların planlanması, azaltım ve uyum çalışmalarının seyrinin belirlenmesi açısından büyük önem arz etmektedir. İklimin yaşamımızdaki önemi, sosyal ve ekonomik hayatı olumlu veya olumsuz nasıl etkilediği ile ilişkili olup, daha iyi koşullar altında yaşamımızı sürdürebilmemiz için ulusal veya uluslararası birçok kurum ve kuruluş iklimde meydana gelebilecek değişimler ve bu değişimlerin etkilerinin doğru saptanabilmesi için farklı şekillerde çaba harcamaktadırlar. Bu çabaların en önemlisini modelleme çalışmaları oluşturmaktadır (Demircan ve diğ., 2014). Modelleme çalışmaları gelecekteki durumun hayali olarak ortaya konması veya alternatif senaryoların değerlendirilmesi amacıyla yapılmaktadır (Demircan ve diğ., 2017).

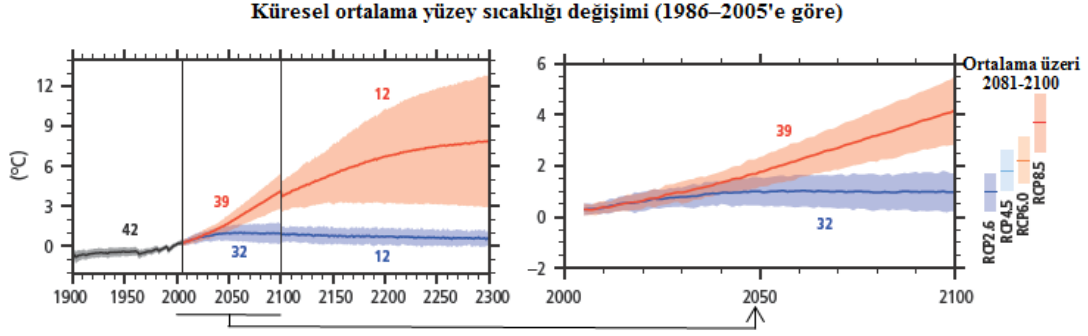
Bu kapsamda, IPCC 5. Değerlendirme Raporunda çeşitli konsantrasyon senaryoları belirlenmiş ve bu senaryolar Temsili Konsantrasyon Rotaları (RCP) olarak isimlendirilmiştir. RCP'ler, sera gazlarının toplam emisyon ve konsantrasyonu, arazi kullanımı ve arazi örtüsü, kimyasal olarak aktif gazlar ve aerosoller için oluşturulan veri setleridir. RCP3-PD (RCP2.6), RCP4.5, RCP6.0 ve RCP8.5 olmak üzere 4 adet RCP tipi tanımlanmıştır. Raporda yayınlanan verilere göre küresel iklim projeksiyonlarında RCP2.6 senaryosu ile 32, RCP4.5 senaryosu ile 42, RCP6.0 senaryosu ile 25 ve RCP8.5 senaryosu ile 39 farklı küresel model çalışması yapılmış olup, küresel ölçekte en fazla tercih edilen senaryolar RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları olmuştur. RCP8.5 muhtemel en yüksek ışınsal zorlama ve konsantrasyon rotası olup 2100 yılında ışınsal zorlamanın $8,5 \text{ W/m}^2$ 'ye ulaşması beklenmektedir. RCP4.5 ise orta stabilizasyon rotası olup 2050-2100 yılları arasında ışınsal zorlamanın $4,5 \text{ W/m}^2$ 'de sabitleneceğini varsaymaktadır (IPCC, 2013; MGM, 2013).

Temsili konsantrasyon rotaları için emisyon senaryo sonuçları Şekil 2.3'te verilmiştir (IPCC, 2014). Sonuçlar; yüksek sera gazı emisyonu azaltımı senaryosu olan RCP2.6'yı, ara senaryolar olan RCP4.5 ve RCP6.0 ile yüksek emisyonlu RCP8.5 senaryosunu içermektedir.



Şekil 2.3 : RCP emisyon senaryo sonuçları (IPCC, 2014).

Küresel ortalama yüzey sıcaklığındaki değişim ise Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 : Küresel ortalama yüzey sıcaklığı değişimi (IPCC, 2014).

1986–2005'e göre 2016–2035 dönemi için küresel ortalama yüzey sıcaklığı değişimi, dört RCP için de benzer olup, muhtemelen 0,3°C ile 0,7°C aralığında bir değişim olması öngörülmektedir. Bu aralık, büyük volkanik patlamalar veya doğal kaynaklarda değişiklik olmayacağını ya da güneş ışınımında beklenmedik değişiklikler olmayacağını varsaymaktadır. Gelecekteki iklim, geçmişteki insan kaynaklı emisyonların neden olduğu ısınmanın yanı sıra gelecekteki insan kaynaklı emisyonlara ve doğal iklim değişkenliğine bağlı olacaktır. 21. yüzyılın ortalarına gelindiğinde, tahmin edilen iklim değişikliğinin büyüklüğü, emisyon senaryolarının seçiminden önemli ölçüde etkilenmektedir.

Emisyonlar ve küresel ortalama sıcaklığındaki artışa ek olarak, ısı dalgalarının daha sık meydana gelmesi ve aşırı yağış olaylarının birçok bölgede daha yoğun ve sık aralıklarla oluşması diğer muhtemel etkiler olacaktır. Okyanuslar ısınmaya ve asitlenmeye devam edecek ve küresel ortalama deniz seviyesi yükselmeye devam edecektir (IPCC, 2014)..

Türkiye için iklim projeksiyonları, ülkemizin iklim değişikliğinden gelecekte nasıl etkileneceğinin belirlenmesi amacıyla T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından geliştirilmektedir. Güncel çalışmada Türkiye ve bölgesi için HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2M küresel model veri setleri kullanılmış olup, RegCM4.3.4 Bölgesel Modeli ile dinamik ölçek küçültme yöntemiyle RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre 1971-2000 referans periyotlu olacak şekilde 2016-2099 için 20 km çözünürlüklü projeksiyon sonuçları elde edilmiştir. RCP4.5 senaryosuna göre 2016-2099 döneminde Türkiye yıllık ortalama sıcaklıklarının ortalama olarak 1,5-2,6°C aralığında, RCP8.5 senaryosuna göre ise 2,5-3,7°C aralığında artması beklenmektedir. Yağışlarda genel olarak azalma beklenmekle

birlikte sürekli bir artış yada azalış trendi olmadığı ve yağış düzensizliklerinin artma eğiliminde olduğu sonucuna varılmıştır (MGM, 2015)

2.2 Uluslararası Müzakere Süreçleri ve Türkiye'nin Konumu

2.2.1 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve Kyoto Protokolü

İnsan kaynaklı faaliyetlerin neden olduğu küresel ısınmanın iklim üzerindeki etkilerine karşı, 1992 yılında düzenlenen Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda (Rio Dünya Zirvesi) imzaya açılan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS), uluslararası alanda atılan ilk ve en önemli adımdır.

Sözleşme ülkeleri gelişmişlik düzeylerine göre EK-I (sanayileşmiş ülkeler/pazar ekonomisine geçiş sürecinde olan ülkeleri), EK-II (sanayileşmiş ülkeler) ve EK-Dışı ülkeler (gelişmekte olan ülkeler) olarak sınıflandırmakta olup, EK-II listesinde yer alan gelişmiş ülke tarafları EK-I listesinde yer alan taraflardan farklı olarak, gelişmekte olan ülkelere Sözleşme'den kaynaklanan yükümlülüklerini yerine getirmelerine yardımcı olmak, finansal destek sağlamak ve teknoloji transferi yapmak gibi yükümlülüklerle sahiptir.

BMİDÇS'nin imzaya açıldığı dönemde Türkiye, gelişmekte olan bir ülke olmasına rağmen Sözleşme'nin OECD üyesi olması sebebiyle EK-I ve EK-II listesine dahil edilmiştir. Türkiye 1997 yılında EK-I ve EK-II listelerinden çıkma sürecini başlatmış ve 2001 yılında gerçekleştirilen 7. Taraflar Konferansı'nda kabul edilen 26/CP.7 sayılı karar ile EK-II listesinden çıkarılmış ve diğer EK-I taraflarından farklı konumu tanınarak EK-I listesinde kalmaya devam etmiştir.

21 Mart 1994 tarihinde yürürlüğe giren Sözleşme'ye, Avrupa Birliği (AB) de dahil olmak üzere 197 ülke taraf olup, ülkemiz Sözleşme'ye 24 Mayıs 2004 tarihinde 189. Taraf olarak katılmıştır.

Öte yandan, 1997 yılında gerçekleştirilen 3. Taraflar Konferansı'nda imzalanan ve 16 Şubat 2005 tarihinde fiilen yürürlüğe giren Kyoto Protokolü, sera gazı salımlarını sınırlandırmaları ve azaltmaları için gelişmiş ülkelere bağlayıcı yükümlülükler getirmiştir. Bu kapsamda, Protokol'ün EK-B listesinde yer alan Sözleşme'nin EK-I Tarafları için sayısallaştırılmış sera gazı salım sınırlama veya azaltım yükümlülükleri belirlenmiştir.

Türkiye, 26 Ağustos 2009 tarihinde Kyoto Protokolü'ne Taraf olmuştur ancak, Kyoto Protokolü kabul edildiğinde Türkiye, BMİDÇS'ne taraf olmadığından EK-B listesine dahil edilmemiştir. Bu sebeple, 2008-2012 ve 2013-2020 yıllarını kapsayan Protokolün birinci ve ikinci yükümlülük dönemlerinde herhangi bir sayısallaştırılmış salım sınırlama veya azaltım yükümlülüğü bulunmamaktadır (DB, 2021; Çakmak ve diğ., 2017; ÇŞB, 2017).

2.2.2 Paris Anlaşması

Sözleşmenin uygulanmasını güçlendirmenin yanı sıra, sürdürülebilir kalkınma ve yoksulluğu ortadan kaldırma çabaları bağlamında iklim değişikliği tehdidine karşı küresel tepkiyi güçlendirmek amacıyla, iklim değişikliği konusunda yasal olarak bağlayıcılığı olan uluslararası Paris Anlaşması, 12 Aralık 2015 tarihinde Paris'te gerçekleştirilen 21. Taraflar Konferansı'nda (COP 21) 196 Taraf tarafından kabul edilmiştir. Anlaşma, küresel emisyonların en az % 55'ini oluşturan 55 ülkenin onayı ile 4 Kasım 2016'da yürürlüğe girmiştir. Türkiye, Anlaşmayı 22 Nisan 2016 tarihinde imzalamış, ancak henüz Türkiye Büyük Millet Meclisi onay aşamasını tamamlamamıştır.

Paris Anlaşması, küresel ısınmanın sanayi öncesi seviyelere kıyasla 2°C'nin çok altında, tercihen 1,5 °C derece ile sınırlandırılmasını hedeflemektedir. Bu uzun vadeli sıcaklık hedefine ulaşmak için ülkeler, yüzyılın ortasına kadar iklim nötr bir dünyaya ulaşmak için mümkün olan en kısa sürede sera gazı emisyonlarının azaltımında küresel zirveye ulaşmayı hedeflemektedir. Ülkeleri, iklim değişikliğiyle mücadele edilmesi ve iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlanması noktasında iddialı çabalar üstlenmek için ortak bir davaya getirmesi ve bağlayıcı bir anlaşma olması sebebiyle Paris Anlaşması iklim değişikliği sürecinde bir dönüm noktasıdır.

Azaltım, uyum, finans, kayıp ve zarar, teknoloji geliştirme ve transferi, kapasite geliştirme, şeffaflık ve küresel envanter gibi hususlara ilişkin kararlar içeren Anlaşma'da, sıcaklık hedefine ek olarak;

- Ülkelerin iklim değişikliğinin etkileriyle başa çıkma yeteneklerinin arttırılması ve finansman akışlarının tutarlı hale getirilmesi,
- Gelişmekte olan ülkelerin ve kırılgan ülkelerin kendi ulusal hedefleri doğrultusunda eylemlerinin desteklenmesi,

- Tüm Taraflar tarafından “ulusal olarak belirlenmiş katkılar” (NDC'ler) yoluyla en iyi çabaların ortaya koyulması ve önümüzdeki yıllarda bu çabaların güçlendirilmesi,
- Yeşil İklim Fonu’nun (GCF), en az gelişmiş ülkelere ve diğer gelişmekte olan ülke Taraflarına desteği hızlandırması
- En Az Gelişmiş Ülkeler ve Küçük Ada Devletleri başta olmak üzere ihtiyacı olan gelişmekte olan ülkelere finans, teknoloji ve kapasite geliştirme katkılarının gelişmiş ülke Tarafları tarafından desteklenmesi,
- Gelişmiş ülke Taraflarının mutlak emisyon azaltım hedeflerini üstlenmesi, gelişmekte olan ülke Taraflarının ise “ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluk” ilkesi gereği azaltım çabalarını güçlendirmeyi sürdürmesi,

gibi hususlar üzerinde durmaktadır (UNFCCC, 2021; Çakmak ve diğ., 2017; UNFCCC, 2015)

2.2.3 Emisyon azaltım taahhütleri

Tarihi Paris Anlaşması’nın kabul edildiği COP21 öncesinde ülkeler, kendi yerel koşulları ve yeteneklerini dikkate alarak hazırladıkları sera gazı emisyonlarını azaltma isteklerini BMİDÇS Sekreteryası’na iletmıştır. Niyet Edilen Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkı (INDC-Intended Nationally Determined Contribution) olarak nitelendirilen bu iyi niyet beyanları, iklim değişikliği konusunda ulusal ve uluslararası karar alma süreçleri arasında yapıcı bir geri bildirim döngüsü oluşturmaktadır.

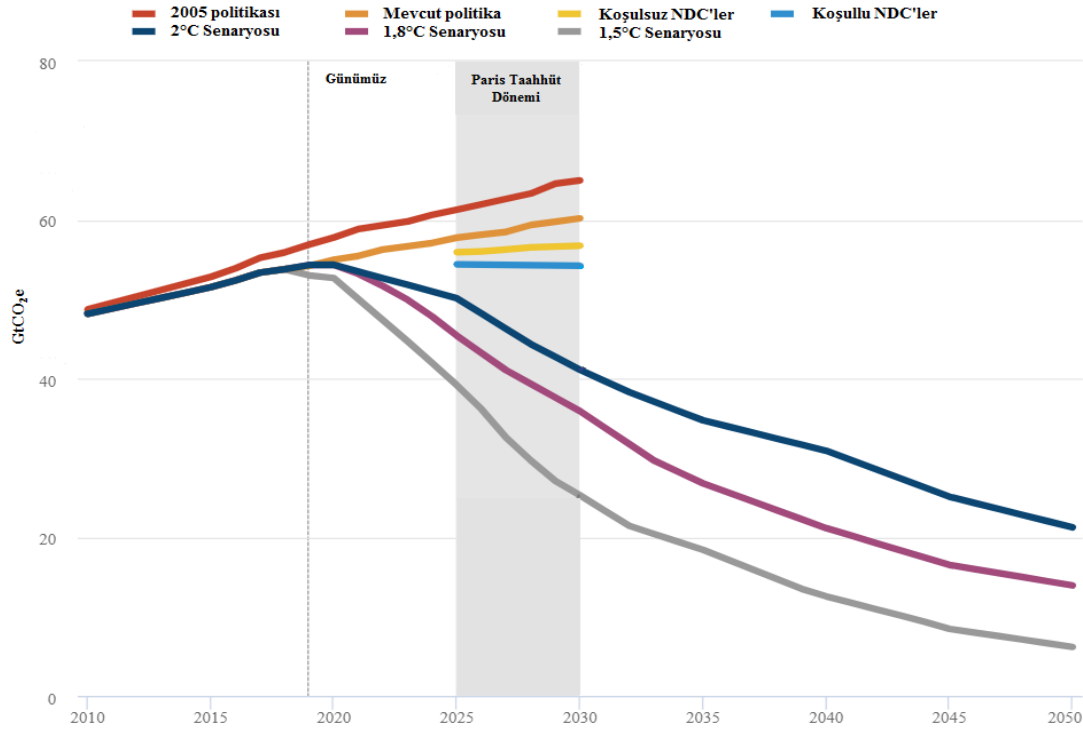
Ülkemiz 30 Eylül 2015 tarihinde ulusal katkı beyanını Sekreterya’ya iletmış olup, sera gazı emisyonlarında 2030 yılında artıştan %21 oranında azaltım katkısı hedeflediğini beyan etmiştir. Bu hedefe ulaşılması için belirlenen çıkan plan ve politikalardan bazıları; güneş ve rüzgar enerjisinden elektrik üretim kapasitesinin arttırılması, 1 adet nükleer santralin devreye alınması, kayıp kaçak oranının azaltılması, karayolu ulaşımı kaynaklı yakıt tüketiminin azaltılması ve eski model araçların trafikten çekilmesi, yeni ve mevcut binaların enerji verimli hale getirilmesi, iyi tarım uygulamalarının desteklenmesi, atıkların geri kazanımı ve atıklardan enerji kazanımının sağlanması, yutak alanların arttırılması, orman rehabilitasyonu ve mera ıslah çalışmalarının yürütülmesi şeklindedir (ÇŞB, 2015).

Paris iklim konferansı öncesinde niyet edilen ulusal katkı beyanı şeklinde hazırlanan ulusal azaltım taahhütlerinin, Paris Anlaşması onaylandıktan sonra Ulusal Olarak Belirlenen Katkı (NDC) şeklinde resmileştirilmesi ve Sekreteryaya sunulması gerekmektedir. NDC'ler, Paris Anlaşması'nın ve uzun vadeli hedeflerine ulaşmanın merkezinde yer almaktadır. NDC'ler, her ülkenin ulusal emisyonları azaltma ve iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlama çabalarını somutlaştırmakta olup; Paris Anlaşması, her bir Tarafın gerçekleştirmeyi amaçladığı NDC'ler hazırlamasını, iletmesini ve her beş yılda bir güncellemesini gerektirmektedir.

Mevcut durumda Paris Anlaşması küresel emisyonların %93,2'sini oluşturan 191 ülke tarafından onaylanmış ve 192 ülke tarafından NDC'ler sunulmuştur. İçinde Avrupa Birliği, Ukrayna, Danimarka, Avusturya, Belçika, Fransa, Almanya, İsviçre, Norveç, Kanada, Meksika, ABD, Güney Kore ve Japonya'nın da bulunduğu ve küresel emisyonların %28,2'sinden sorumlu 29 Taraf ise uzun dönemli stratejilerini sunmuştur (WRI, 2021).

Tarafların sunmuş olduğu emisyon azaltım taahhütlerinin Paris Anlaşması'nın hedeflerine ulaşmada ne derece etkili olacağına ilişkin çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan birinde Birleşmiş Milletler Çevre Programı, ülkelerin yapmayı taahhüt ettikleri eylemler ile üzerinde mutabık kalınan iklim hedeflerine ulaşmak için nelere ihtiyaç duyulacağı arasındaki farkı incelemiştir. Yapılan çalışmadan uyarlanan grafik Şekil 2.5'te verilmiştir (CarbonBrief, 2019; UNEP, 2019).

Bu kapsamda, ülkelerin taahhüt ettikleri emisyon azaltımları ile Paris Anlaşması hedefleri arasında büyük bir uçurum olduğu görülmektedir. Koşulsuz NDC'lerin tam olarak uygulanmasının, 2°C senaryosuna kıyasla 2030'da 15 GtCO₂e'lik bir boşluğa neden olacağı ve ısınmanın 2°C'nin altında kalması olasılığının %66 olduğu tahmin edilmektedir. Bu emisyon açığı 1,5°C senaryosu için 32 GtCO₂e'dir. Hem koşulsuz hem de koşullu NDC'lerin tam olarak uygulanması bu açığı yaklaşık 3 GtCO₂e azaltacaktır (UNEP, 2019).



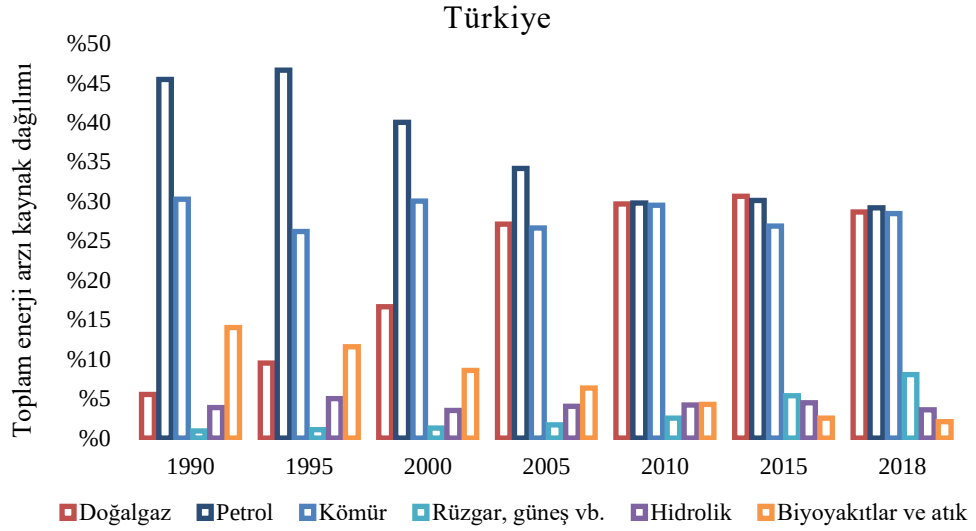
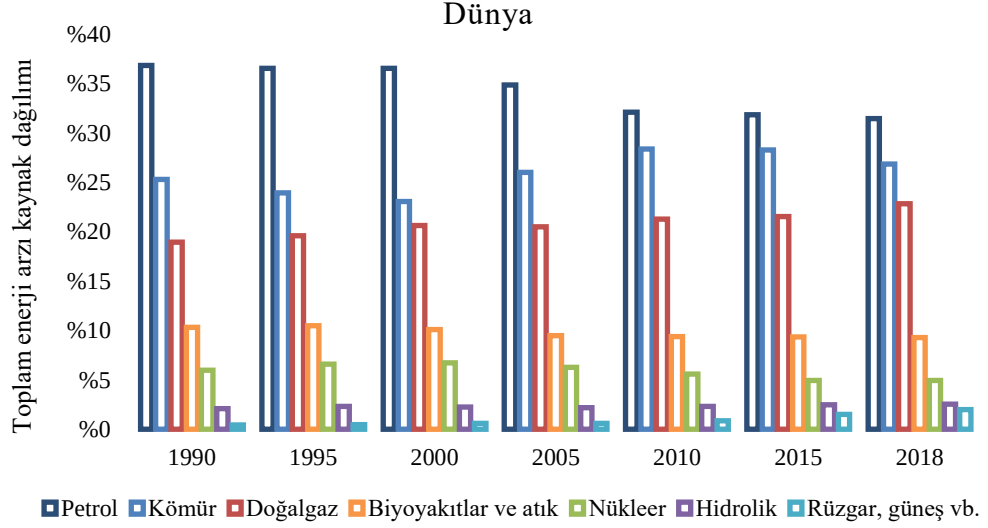
Şekil 2.5 : Farklı senaryolar altında küresel sera gazı emisyon hedefi açığı (UNEP, 2019).

Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere küresel ısınmanın sanayi öncesi seviyelere kıyasla 2°C'nin çok altında tutulması ve mümkünse 1,5°C derece ile sınırlandırılması hedefine ulaşılması için ülkelerin, mevcut plan ve politikalarına ek olarak sunmuş oldukları ulusal katkı hedeflerinde de önemli iyileştirmeler yapmaları gerekmektedir.

2.3 Dünya ve Türkiye'nin Durumu

2.3.1 Enerji görünümü

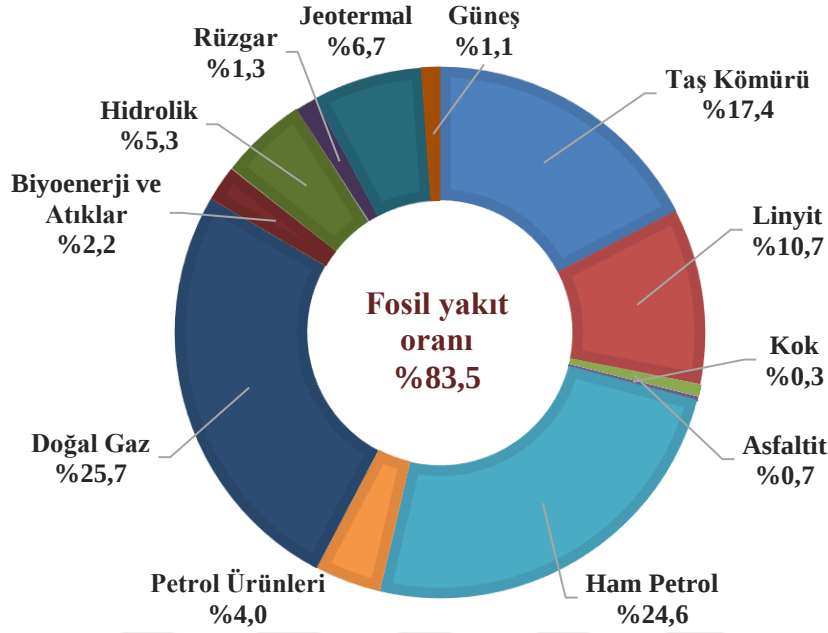
Günümüzdeki en önemli küresel problemlerden biri olan iklim değişikliğiyle mücadelenin merkezinde enerji sorunu bulunmaktadır. Küresel ısınmanın uluslararası anlaşmalar ile hedeflenen düzeyde sınırlandırılabilmesi için fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesi gerekmektedir. Toplam enerji arzının kaynaklara göre dağılımı yıllara göre olarak Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 : Yıllara göre toplam enerji arzının kaynaklar bazında dağılımı (IEA, 2021).

1990 yılında yaklaşık 8.766 milyon TEP olan Dünyanın toplam enerji arzı 2018 yılında %63 oranında bir artışla 14.280 milyon TEP'e ulaşmıştır. Türkiye'nin 1990 yılında 51,5 milyon TEP olan toplam enerji arzı ise %179 artışla 2018 yılında yaklaşık 144 milyon TEP olmuştur. Kaynaklar bazında dağılım incelendiğinde hem dünya genelinde hem de ülkemizde fosil yakıtlar olan petrol, kömür ve doğalgazın başı çektiği görülmektedir. 2018 yılında toplam enerji arzında fosil yakıtların oranı Dünya genelinde %81,2'dir. Aynı oran hidrolik, biyoyakıtlar ve atık ile güneş, rüzgar vb. içeren yenilenebilir kaynaklar için %13,8'dir. Dünya genelinde ayrıca toplam enerji arzı kaynaklarının yaklaşık %5'ini nükleer oluşturmaktadır (IEA, 2021). Şekil 2.7'de verilmiş olan Türkiye'nin birincil enerji arzının kaynaklara göre detaylı dağılımına

göre, 2019 yılında fosil yakıt oranı toplamda %83,5, hidrolik %5,3, biyoenerji ve atıklar ile rüzgar, güneş ve jeotermal oranı ise %11,3'tür (EİGM, 2021).



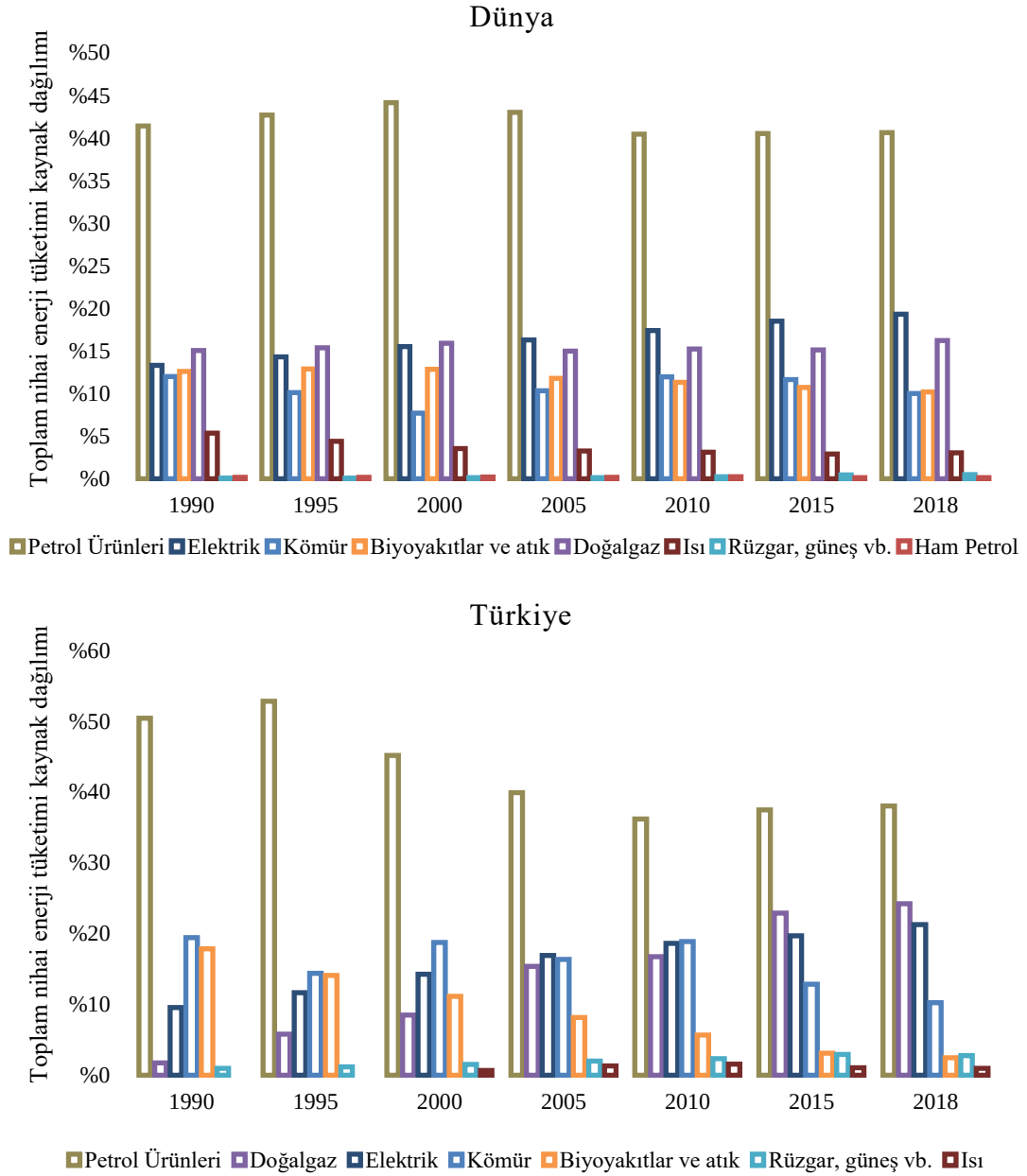
Şekil 2.7 : Türkiye birincil enerji arzının kaynaklar bazında dağılımı,2019 (EİGM, 2021).

Türkiye’de 2019 yılında elektrik enerjisi üretimi yaklaşık 304 TWh olmuştur. Türkiye’nin toplam elektrik enerjisi üretimi 1990 yılına göre %428, oranında artmıştır. Türkiye’de 1990 yılında toplam üretilen elektrik enerjisi üretiminde katı yakıtlar %35, doğalgaz %18, sıvı yakıtlar %7, hidrolik %40 paya sahip olmuştur. 2019 yılında ise katı yakıtlar %37, doğalgaz %19, hidrolik %29, diğer yenilenebilir kaynaklar %15 paya sahiptir (EİGM, 2021).

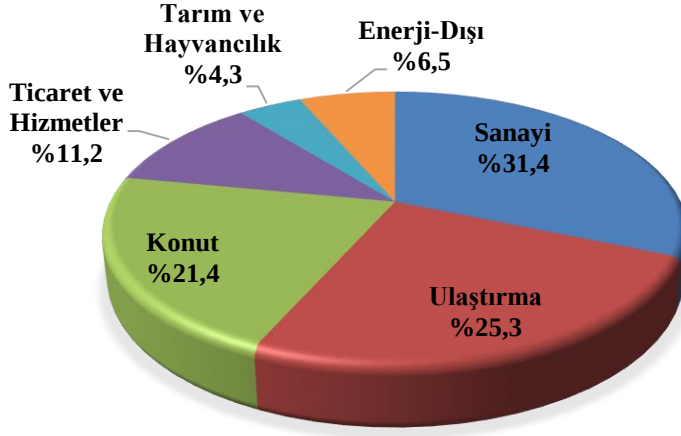
Nihai enerji tüketimi, hanehalkı, sanayi, ulaştırma ve tarım gibi son kullanıcılar tarafından tüketilen toplam enerjidir. Nihai enerji tüketimi, dağıtım ve dönüşüm dahil olmak üzere enerji sektörü tarafından kullanılan enerjiyi içermemektedir. Dünya geneli ve Türkiye’nin yıllara göre toplam nihai enerji tüketiminin kaynaklar bazında Şekil 2.8’de dağılımı verilmiştir.

1990 yılında yaklaşık 6.267 milyon TEP olan Dünyanın toplam nihai enerji tüketimi 2018 yılında %58,6 oranında bir artışla 9.938 milyon TEP’e ulaşmıştır. Türkiye’nin 1990 yılında 40 milyon TEP olan toplam nihai enerji tüketimi ise %155 artışla 2018 yılında yaklaşık 103 milyon TEP olmuştur. 2018 kaynaklar bazında dağılım incelendiğinde petrol ürünlerinin dünyada yaklaşık %41, Türkiye’de ise %38 ile en

yüksek orana sahip olduğu görülmektedir. Dünyada elektrik tüketimi %19,3 ile ikinci sırayı alırken ülkemizde %24,2 ile doğalgaz daha çok tüketilmektedir (IEA, 2021).



2019 yılında Türkiye’de, nihai enerji tüketiminde sanayi sektörü payı %31,4, ulaştırma sektörü payı %25,3 ve konut sektörü %21,4’tür. Ticaret ve hizmetler, tarım ve hayvancılık ile enerji-dışı tüketiminin payları ise sırasıyla %11,2, %4,3 ve %6,5 olmuştur (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 : Türkiye birincil enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımı (EİGM, 2021).

Sektörel enerji tüketimlerine göre, petrol ürünleri %67’lik bir oran ile en fazla ulaştırma sektöründe kullanılmaktadır. Doğalgazın %46’sı konutlarda, %34’ü ise sanayide tüketilmektedir. Doğalgazın yanı sıra taşkömürünün %41’i, linyitin %24’ü ve asfaltitin %30’u konutlarda kullanılmaktadır. 2018 yılında sektörel enerji tüketiminin %72,5’ini fosil yakıtlar oluşturmuş olup, bu oran 2019 yılında %73,2’ye çıkmıştır (EİGM, 2021).

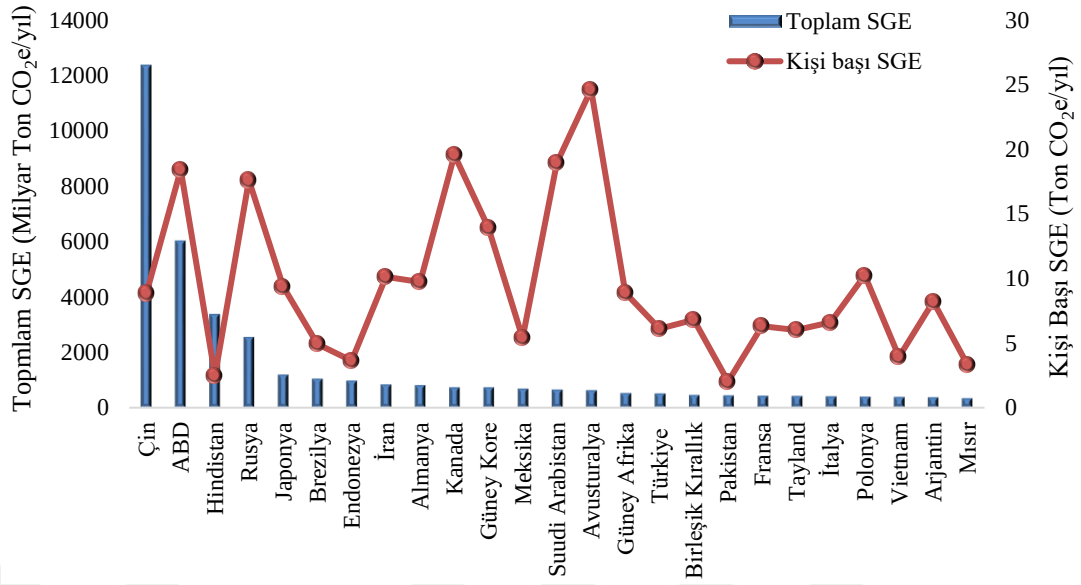
Görüldüğü üzere hem dünyada hem de ülkemizde enerji sektöründe yoğun bir şekilde fosil yakıt kullanımına devam edilmektedir. Öte yandan yıllar geçtikçe yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönelik yatırımlar devam etmektedir. Güvenilir bir güç kaynağı olan yenilenebilir enerji, ithal yakıt ihtiyacını azaltmakta, enerji güvenliğini arttırmakta ve ülkenin doğal kaynaklarının korunmasına da yardımcı olmaktadır.

Halihazırda fosil yakıtların yüksek oranda kullanımı, her yıl atmosfere salınan sera gazı miktarının artmasına sebep olmaktadır.

2.3.2 Sera gazı emisyonları

İklim değişikliğine neden olan sera gazı emisyonları 1800’lerin ortalarından bu yana 50 kat artış göstermiştir. Sera gazı emisyonlarının % 64’ü sadece 10 ülkeden gelirken, en az emisyon yapan 100 ülke % 3’ten daha az katkıda bulunmaktadır.

Türkiye’nin de içinde bulunduğu en yüksek sera gazı salımına sebep olan 25 ülke ve bu ülkelerdeki kişi başı sera gazı emisyonları Şekil 2.10’da görülmektedir (CW, 2018; WB, 2018a).



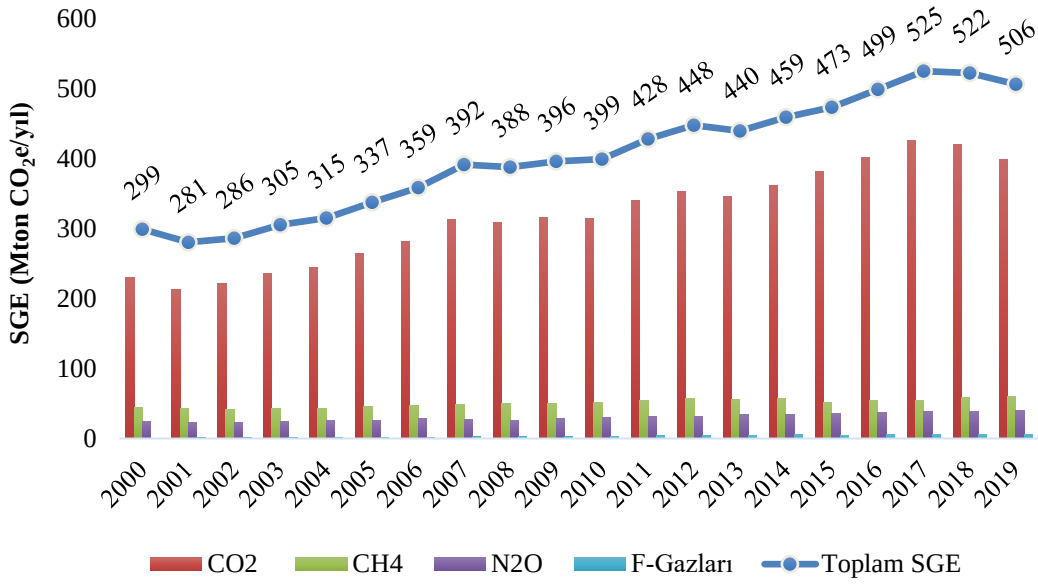
Şekil 2.10 : Ülkelerin toplam ve kişi başı sera gazı salımları (CW, 2018; WB, 2018a).

2018 yılı verilerine göre Çin, %26'lık bir oranla dünyada en çok sera gazı salımı yapan ülkedir. Çin'i sırasıyla %12,7 ile ABD ve %7,1 ile Hindistan izlemektedir. Dünyayı en çok kirleten bu üç ülkenin sera gazı emisyonlarının 1990 yılına göre değişimlerine bakıldığında ise gelişmiş bir ülke olan ABD'nin emisyonlarında sadece %1,1'lik bir artış olurken, gelişmekte olan Çin ve Hindistan'ın emisyonlarında sırasıyla %280 ve %175 oranında yüksek bir artış gerçekleşmiştir. Nüfus artışı olmasına rağmen ABD, 1990 yılında yaklaşık 24 t/yıl olan kişi başı sera gazı salımını 2018 yılına gelindiğinde 18,4 t/yıl'a düşürürken, Çin 2,8 t/yıl değerinden 8,9 t/yıl'a, Hindistan ise 1,4 t/yıl değerinden 2,5 t/yıl'a çıkarmıştır.

24,6 t/yıl ile kişi başı sera gazı emisyonu açısından ilk sırayı alan Avusturalya, toplam sera gazı salımlarında dünyada 14. sıradadır. Kişi başı 19,6 t/yıl ile Kanada toplam salımlarda 10.sırada gelmekte, 18,9 t/yıl ile takip eden Suudi Arabistan ise toplam salımlarda 13. Sırada yer almaktadır.

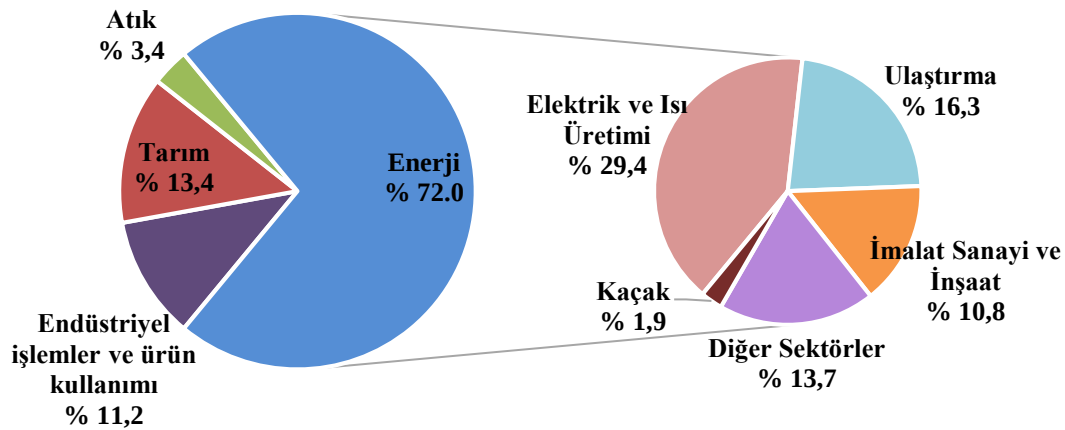
Gelişmekte olan bir ülke konumundaki Türkiye, mevcut durumda küresel sera gazı emisyonlarının %1,1'ine sebep olmakta ve 16.sırada yer almaktadır. 1990 yılında 3,8 t/yıl olan kişi başı sera gazı salımı, 2018 yılına gelindiğinde 6,6 t/yıl değerine ulaşmıştır.

Türkiye'nin yıllara göre toplam sera gazı emisyon miktarındaki değişim Şekil 2.11'de verilmiştir (TÜİK, 2021a).



Şekil 2.11 : Türkiye'nin yıllara göre toplam sera gazı emisyonu (TÜİK, 2021a).

2019 yılında toplam 506 MtonCO₂e sera gazı salımı gerçekleşmiştir. Bir önceki yıla göre %3,2 oranında azalma sağlanmış olan toplam salımının %70'unu CO₂, %12'sini CH₄, %8'ini N₂O ve yaklaşık %1'ini F-gazları oluşturmuştur. Grafik incelendiğinde yıllar itibariyle meydana gelen sürekli artışın, son iki yılda düşüşe geçtiği görülmüştür. 2019 yılı toplam sera gazı emisyonunun sektörler bazında dağılımı Şekil 2.12'de verilmiştir (TÜİK, 2021a).



Şekil 2.12 : Türkiye toplam sera gazı emisyonunun sektörler göre dağılımı (TÜİK, 2021a).

Toplam salımların % 72'si enerji sektöründen kaynaklanmakta olup, 2019 yılında enerji sektörü kaynaklı toplam SGE 364,4 MtonCO₂e olmuştur. Tarım sektörü 68 MtonCO₂e ile toplam salımların %13,4'ünü, endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı 56,4

MtonCO₂e ile toplam salımların %11,2'sini ve atık sektörü 17,2 MtonCO₂e ile %3,4'ünü oluşturmaktadır.

Enerji sektörü kaynaklı sera gazı emisyonları, %41 oranında elektrik ve ısı üretimini, %23 oranında ulaştırma sektörünü, %15 oranında imalat sanayi ve inşaat sektörünü, %19 oranında konut ve hizmetleri de içeren diğer sektörleri ve %3 oranında kaçak emisyonları kapsamaktadır. Enerji sektörü alt kategorilerinin toplam emisyon içerisindeki payları incelendiğinde, %29'luk bir oran ile elektrik ve ısı üretiminin ardından, %16 ile ulaştırma sektörü gelmektedir. Bu çalışma kapsamında modellenen ulaştırma sektörü bir sonraki bölümde detaylı olarak ele alınmıştır.





3. ULAŖTIRMA SEKTÖRÜ

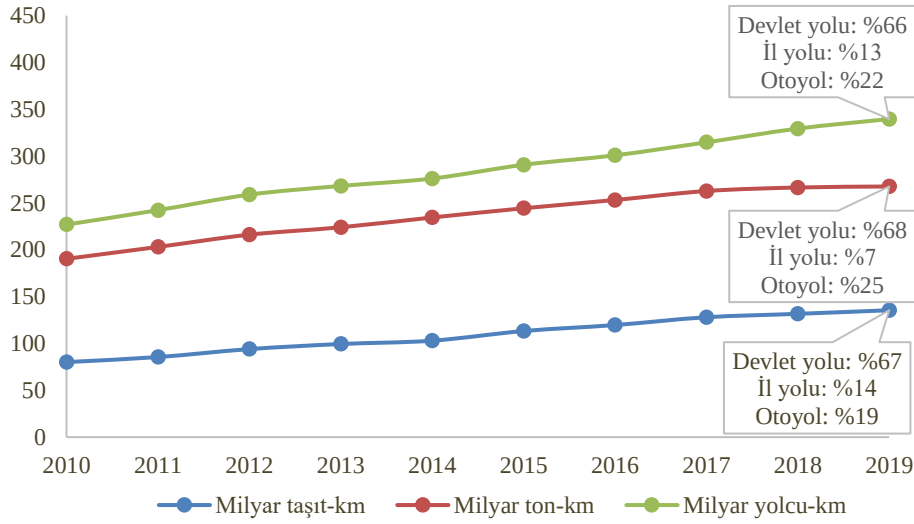
UlaŖtırma sektörü ekonominin önemli bir bileŖeni olup, kalkınma için kullanılan bir araç olarak düşünölmektedir. Ölkemizde ulaŖtırma sektörü özellikle son yıllarda büyük gelişim göstermekte, bu gelişim ile birlikte kaynak tüketimi ve sera gazı salımları da artmaya devam etmektedir.

3.1 Türkiye’de UlaŖtırma

Ölkemizde ulaŖtırma sektörünün 2019 yılı birincil enerji tüketimi 27,7 milyon TEP ile sektörel tüketimler arasında toplam sanayi tüketiminden sonra ikinci sırada yer almaktadır. UlaŖtırma sektörü birincil enerji tüketiminin yaklaşık %93’ünü karayolları, %4,2’sini havayolları, %1,4’ünü denizyolları %1’ini boru hatları ve %0,7’sini demiryolları oluşturmaktadır (EİGM, 2021).

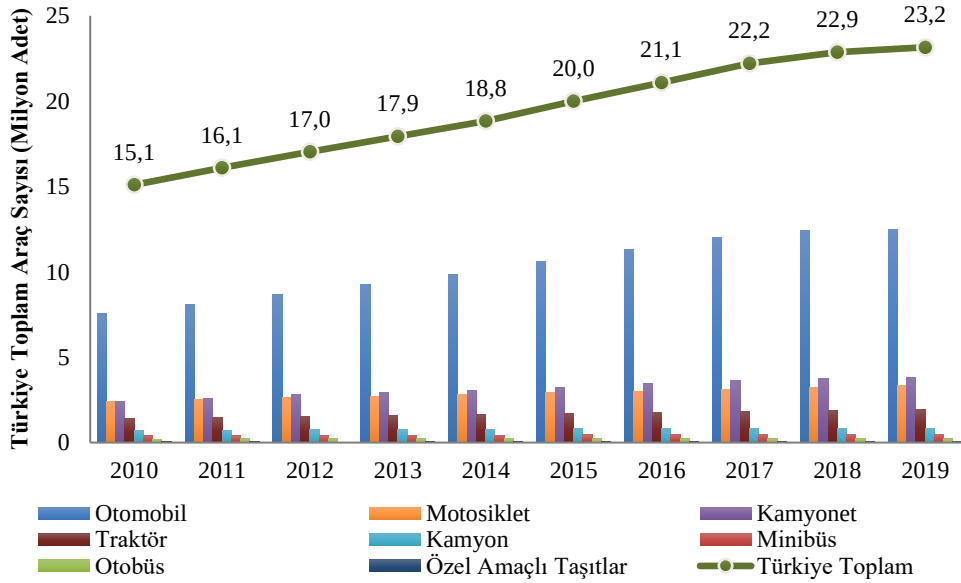
Birincil enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluşturan karayollarında 2019 yılında toplamda 301,6 milyar kilometre yol katedilmiştir. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM)’nün sorumluluğunda olan ve mevcut durumda toplam uzunluğu 68.633 km olan yol ağının yaklaşık %50’si il yolları, %45’i devlet yolları ve %5’i otoyollardan oluşmaktadır (KGM, 2021). Bu yollara ait karayolu seyir, yük ve yolcu taşımalarının yıllara göre değişimi Şekil 3.1’de verilmiştir. Şekilde ayrıca 2019 yılı için yollara ilişkin dağılım da görölmektedir.

KGM’ye bağılı yollarda taşıt-km değerleri son 9 yılda yaklaşık %69 artış göstererek 135 milyar taşıt-km değerine ulaşmıştır. 2019 yılı yük ve yolcu taşımacılığı değerleri sırasıyla 268 milyar ton-km ve 340 milyar yolcu-km şeklindedir (TÜİK, 2021c).



Şekil 3.1 : Karayolu seyir, yük ve yolcu taşımalarının yıllara göre değişimi (TÜİK, 2021c).

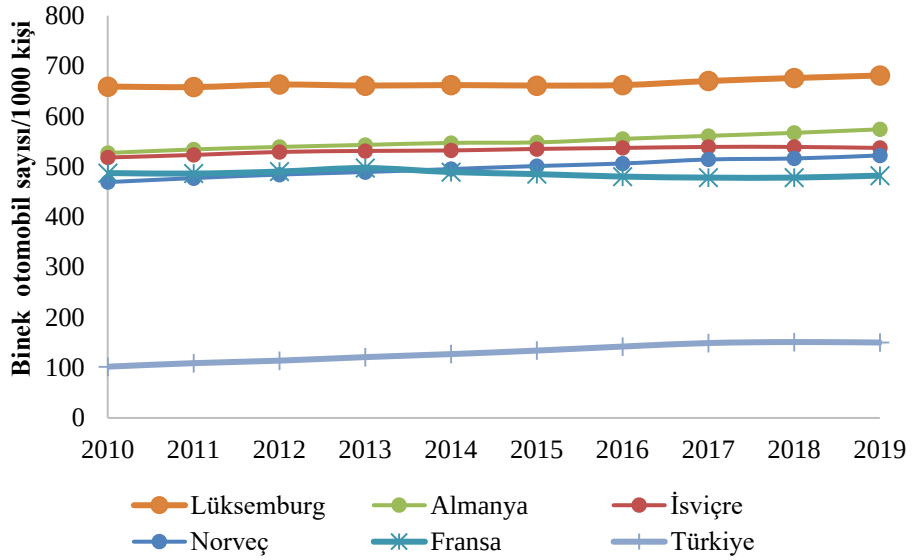
Karayolu ulaşımındaki motorlu kara taşıtı sayısının Türkiye ve İstanbul için yıllara göre değişimi Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2 : Türkiye motorlu kara taşıtı sayısının yıllara göre değişimi (TÜİK, 2021b, 2021c).

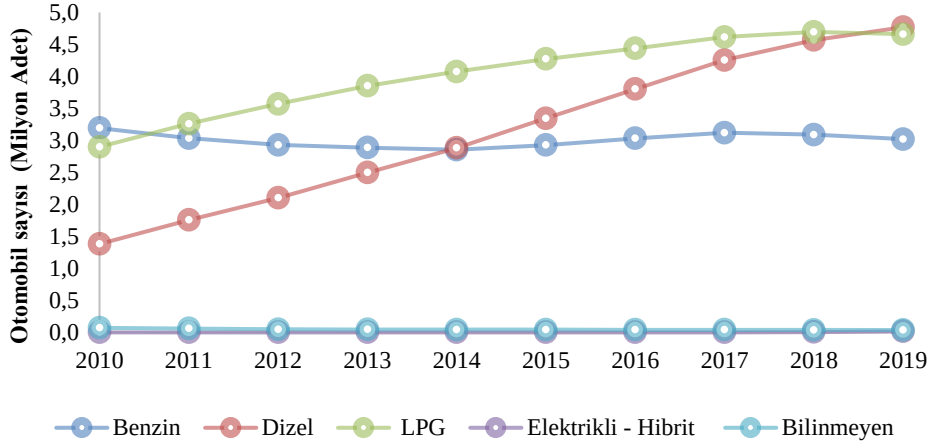
Türkiye’nin 2019 yılı motorlu kara taşıtı sayısı yaklaşık 23,2 milyon olup, 2010 yılına göre %53 artış göstermiştir. Otomobiller %54’lük bir oran ile toplam araç sayısı içerisinde ilk sırayı almaktadır. Bu değeri %16 ile kamyonet ve %14 ile motosiklet takip etmektedir. 2010 yılında bin kişiye yaklaşık 205 motorlu kara taşıtı düşerken, 2019 yılında bu değer 278’e yükselmiştir (TÜİK, 2021b, 2021c).

Binek otomobiller ele alındığında Türkiye ve gelişmiş bazı ülkelere bin kişiye düşen binek otomobil sayısının yıllar itibariyle değişimi Şekil 3.3'te gösterilmiştir (Eurostat, 2021). Türkiye'de 2019 yılında 150 olan 1000 kişi başına düşen binek otomobil sayısının gelişmiş ülkelere göre 3,5-4,5 kat daha az olduğu görülmüştür. Öte yandan, 2010 yılından bu yana Türkiye'de 1000 kişi başına düşen binek otomobil sayısı %47 artarken; Norveç, Almanya, İsviçre ve Lüksemburg'ta sırasıyla %11, %9, %4 ve %3 artmış, Fransa'da ise %1 azalmıştır.



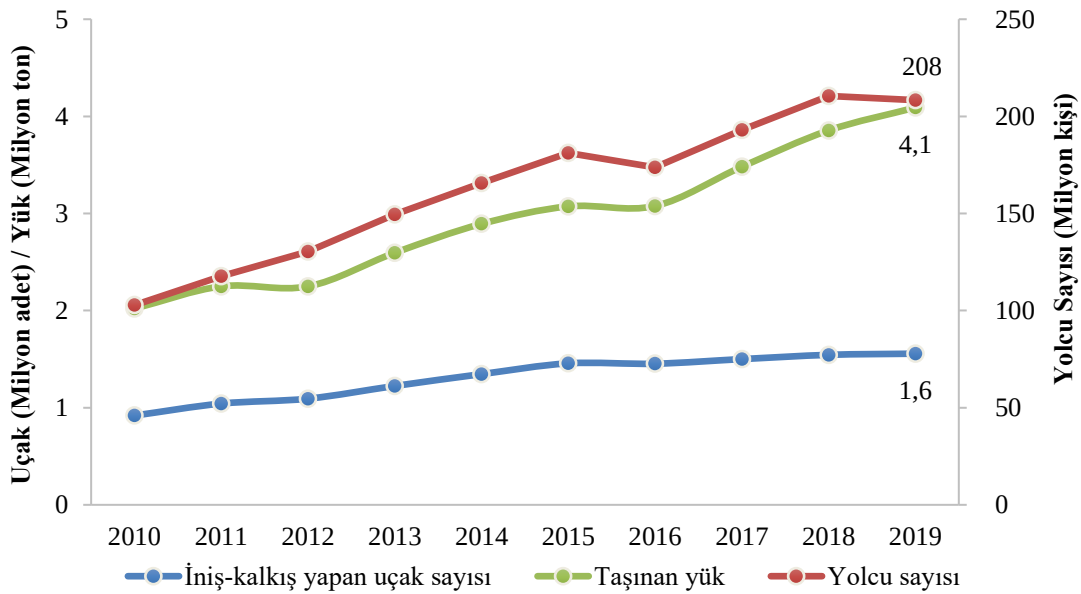
Şekil 3.3 : Yıllar itibariyle ülkeler bazında binek otomobil sayısının değişimi (Eurostat, 2021).

2019 yılı motorlu kara taşıtlarının %51,2'sini dizel yakıtlı araçlar, %27,8'ini benzinli araçlar ve %20,5'ini LPG'li araçlar oluşturmaktadır. Motorlu kara taşıtlarının büyük bir bölümünü oluşturan otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı (Şekil 3.4) dizel, benzin ve LPG'li araçlar için sırasıyla %38,3, %24,4 ve %36,7 şeklinde olup, 2019 yılında %0,3 oranında elektrikli ve hibrit araç bulunmaktadır. Dizel yakıtlı otomobiller son on yılda %351 oranında önemli bir artış göstermiştir. Aynı oran LPG'li otomobiller için %90 olurken benzinli otomobiller son on yılda %5 azalmıştır. 2010'lu yılların başlarından itibaren ülkemizde kullanılmaya başlayan elektrikli ve hibrit araçlar mevcut durumda sadece 36,5 bin adettir (TÜİK, 2021c).



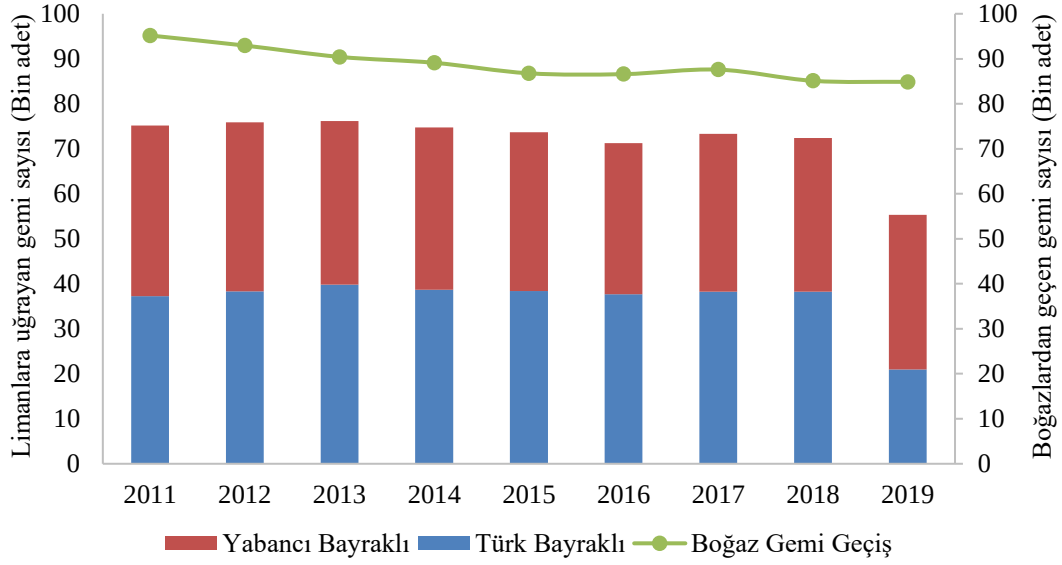
Şekil 3.4 : Otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı (TÜİK, 2021c).

Ulaştırma sektöründe en yüksek payı alan ikinci alt kategori havayolu ulaşımıdır. 37'sinde uluslararası uçuşların da gerçekleştiği toplamda 58 havalimanı faaliyet göstermektedir. Bu havalimanlarına iniş kalkış yapan uçak sayısı, taşınan toplam yük ve yolcu sayısının yıllara göre değişimi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 : Havayolu uçak sayısı, yük ve yolcu taşımalarının yıllara göre değişimi (TÜİK, 2021c).

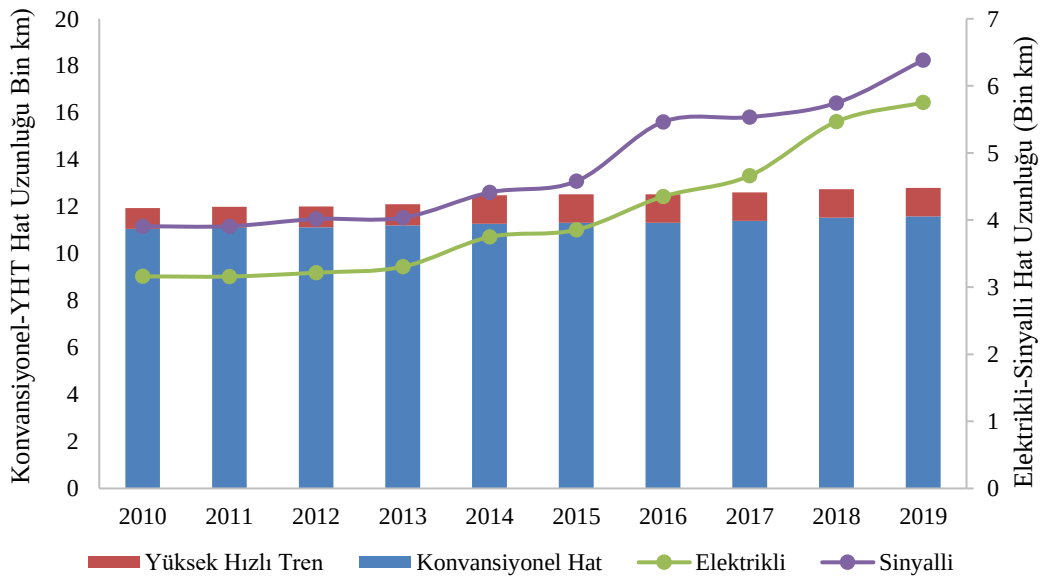
2010 yılından bu yana iniş-kalkış yapan uçak sayısı %69, taşınan yük %102 ve yolcu sayısı %103 artış göstermiştir. 2019 yılında iniş-kalkış yapan yaklaşık 1,6 milyon uçağın %40'ını iç hat uçuşları oluşturmuştur (TÜİK, 2021c). Uçuş sayılarının yıllar itibariyle sürekli artış eğiliminde olmasına karşın, denizyolu ulaşımında limanlarımıza uğrayan ve boğazlardan geçen gemi sayısı gün geçtikçe azalmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Denizyolu limanlara uğrayan ve boğazlardan geçen gemi sayısı (DGM, 2021).

2019 yılında %38'i Türk bayraklı olmak üzere Türkiye limanlarına toplamda 55,3 bin gemi uğramış olup, bu değer 2011 yılına göre %26 oranında azalma göstermiştir. Öte yandan, İstanbul ve Çanakkale Boğazları'ndan 84,9 bin gemi geçişi olmuştur. Boğazlardan geçiş yapan gemi sayısı 2010 yılına göre %13 oranında azalmıştır. Ancak, toplam gros ton bakımından incelendiğinde 2019 yılında 2010 yılına göre %28 oranında artış gerçekleşmiştir. (DGM, 2021).

Demiryolları Türkiye'nin ulaşım ağında stratejik bir öneme sahiptir. Ülkemizin demiryolu hat uzunluklarının yıllara göre değişimi Şekil 3.7'da görülmektedir.



Şekil 3.7 : Demiryolu hat uzunluklarının yıllara göre değişimi (TCDD, 2019).

2019 yılı itibariyle 11.590 km konvansiyonel hat ve 1.213 km yüksek hızlı tren (YHT) hattı olmak üzere toplamda 12.803 km demiryolu hattı bulunmaktadır. Toplam hat uzunluğu 2010 yılından bu yana %7 artış göstermiştir. Bu değerler, Marmaray ve Başkentray dışında şehir içi raylı sistem hatlarını kapsamamaktadır. YHT hatları 2009 yılında 397 km ile demiryolu ulaşımına katılmış olup, 2014 yılında 1.213 km'ye ulaşmıştır. Halihazırda yapımı devam eden hatlar bulunmaktadır. Öte yandan, sinyalizasyon ve elektrifikasyon oranı gün geçtikçe artmaktadır. 2010 yılında 3.908 km olan sinyalli hat uzunluğu 6.382 km'ye; 3.161 km olan elektrikli hat uzunluğu 5.753 km'ye yükseltilmiştir (UAB, 2020a). Demiryollarında 2019 yılında 17,74 milyon yolcu taşınmış, yaklaşık 11 milyar yolcu-km üretimi olmuştur (TCDD, 2019).

3.2 İstanbul ve Ulaşım

3.2.1 İstanbul'un önemi

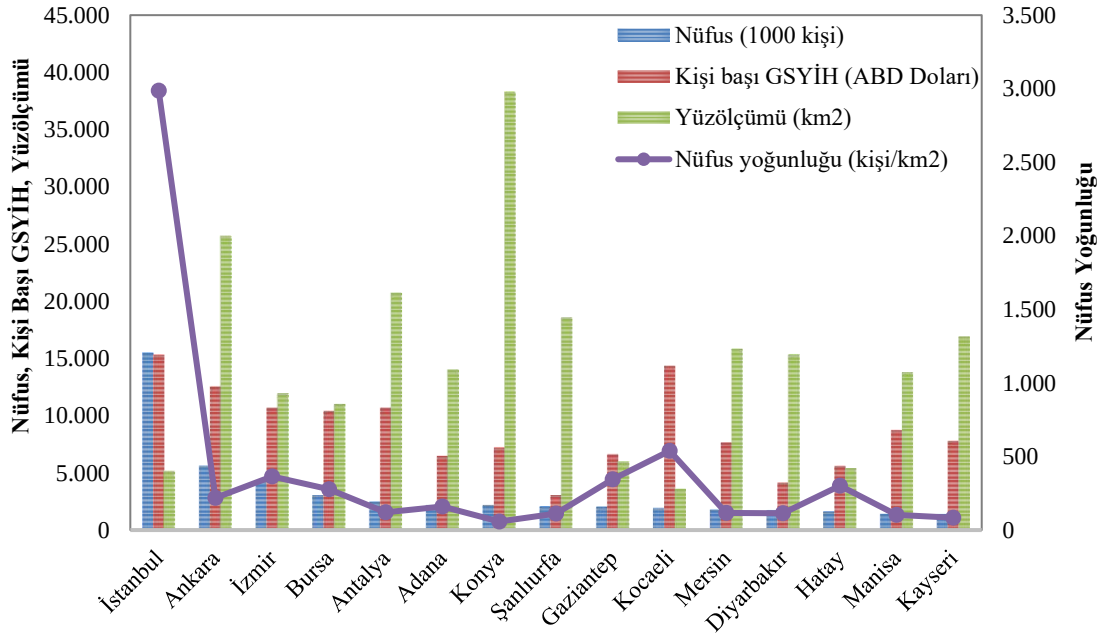
Türkiye'nin kuzeybatısında Marmara Bölgesi'nde yer alan ve Avrupa ile Asya kıtalarını birbirine bağlayan İstanbul, Tekirdağ ve Kocaeli illeri ile komşudur. Uluslararası bir su yolu olan İstanbul Boğazı, Asya ile Avrupa kıtalarını birbirinden ayırmakta ve Marmara Denizi ile Karadeniz'i birbirine bağlamaktadır. Uluslararası deniz taşımacılığının yapılabildiği en dar geçit olma özelliğini taşıyan Boğaz üzerinde 15 Temmuz Şehitler Köprüsü, Fatih Sultan Mehmet Köprüsü ve Yavuz Sultan Selim Köprüsü olmak üzere 3 adet asma köprü bulunmaktadır (Url-1; Url-2) (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : İstanbul haritası.

Şekil 3.9’da Türkiye’nin en yüksek nüfusuna sahip 15 ilinin nüfus verisine ek olarak yüzölçümü, nüfus yoğunluğu ve kişi başına düşen GSYİH değerleri verilmiştir.

5.461 km² ile ülke yüzölçümünün yalnızca %0,7’sini oluşturan İstanbul, küçük bir il olmasına rağmen nüfus ve ekonomik çıktı açısından ulusal olarak baskın bir rol oynamaktadır. İstanbul, 15,52 milyon nüfusu ve 15.285 ABD Doları kişi başı gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH) değeri ile Türkiye’nin en büyük ve en gelişmiş metropol şehridir. Ayrıca, 2987 kişi/km² nüfus yoğunluğu ile zirvede yer almaktadır (TÜİK, 2021b, 2021d; YerelNet, 2021).



Şekil 3.9 : Farklı illerin 2019 yılı nüfus, kişi başı GSYİH, yüzölçümü ve nüfus yoğunluğu karşılaştırması (TÜİK, 2021b, 2021d; YerelNet, 2021).

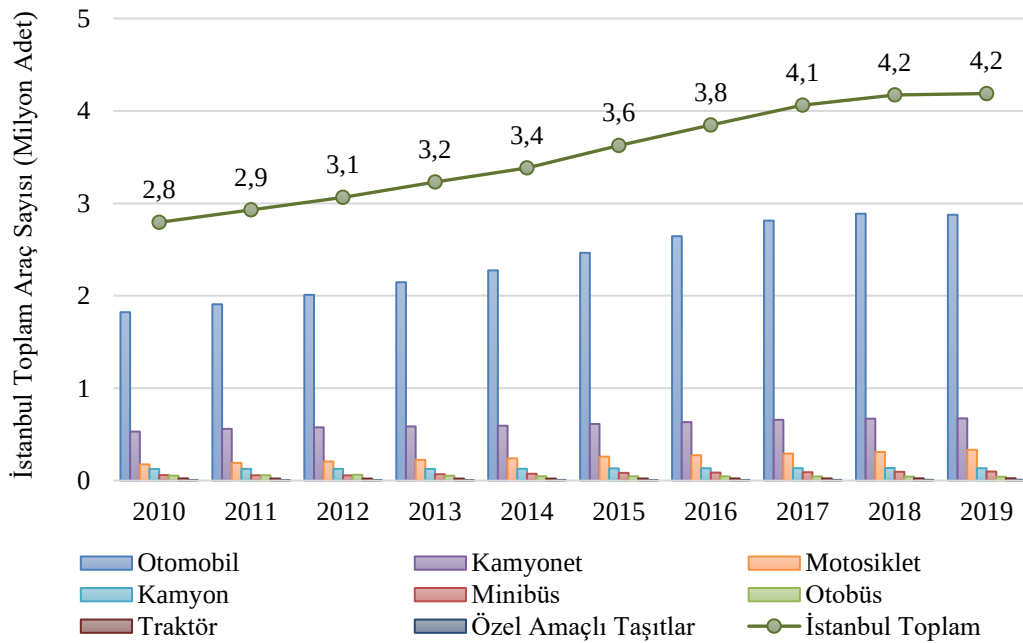
Bilim, kültür ve sanatın merkezi halinde olan, camilerin, sinagogların ve kiliselerin bir arada bulunduğu kültür şehri, 28 saray, 91 medrese, 517 cami, 164 kilise, 19 sinagog, 199 türbe, 595 çeşme ve 93 hamam olmak üzere toplam 1796 tarihi mekanı ile her yıl çok sayıda turisti ağırlamaktadır. 2019 yılında İstanbul’u yaklaşık 15 milyon yabancı turist ziyaret etmiştir (Url-1; Url-2).

İstanbul’da şehir içi ulaşım karayolu, raylı sistem ve denizyolu ile sağlanmaktadır. İstanbul Boğazı şehir içi ulaşımında olduğu kadar uluslararası ulaşımında da önemli bir rol oynamaktadır. İstanbul’un Anadolu ve Avrupa Yakası’nda toplamda 2 adet havalimanı bulunmakta, şehrin stratejik konumu sebebiyle dünyanın en önemli havacılık merkezlerinden biri olarak hizmet etmektedirler.

3.2.2 Karayolu ulaşımı

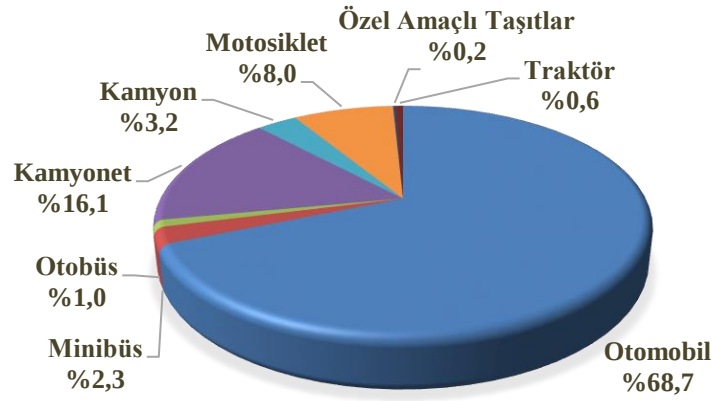
İstanbul, 25 ilçesi Avrupa Yakası ve 14 ilçesi Anadolu Yakası'nda olmak üzere toplam 39 ilçede yoğunlaşmış milyonlarca nüfusa ulaşım hizmeti vermektedir. Özel ulaşımın ve araç sahipliğinin önemli derecede etkin olduğu karayolu ulaşımı, ulaşım ağında en önemli paya sahip olmaktadır.

İstanbul'da yıllar geçtikçe motorlu kara taşıtı sayısında meydana gelen değişim Şekil 3.10'da verilmiştir (TÜİK, 2021c). İstanbul'daki toplam araç sayısı 2010 yılından bu yana %50 oranında artış göstermiştir. Sayısı en fazla artan araç türü %90 ile motosiklet olurken, bu değeri %65 ile minibüs ve %58 ile otomobil izlemektedir. İstanbul, ülke genelindeki motorlu kara taşıtı sayısının %18 gibi çok önemli bir kısmını içermektedir.



Şekil 3.10 : İstanbul motorlu kara taşıtı sayısının yıllara göre değişimi (TÜİK, 2021c).

2019 yılı verilerine göre araçların yaklaşık %69'unu otomobiller oluşturmaktadır (Şekil 3.11). Ülke genelinde 150 olan 1000 kişi başına düşen otomobil sayısı İstanbul için 185 olmuştur.



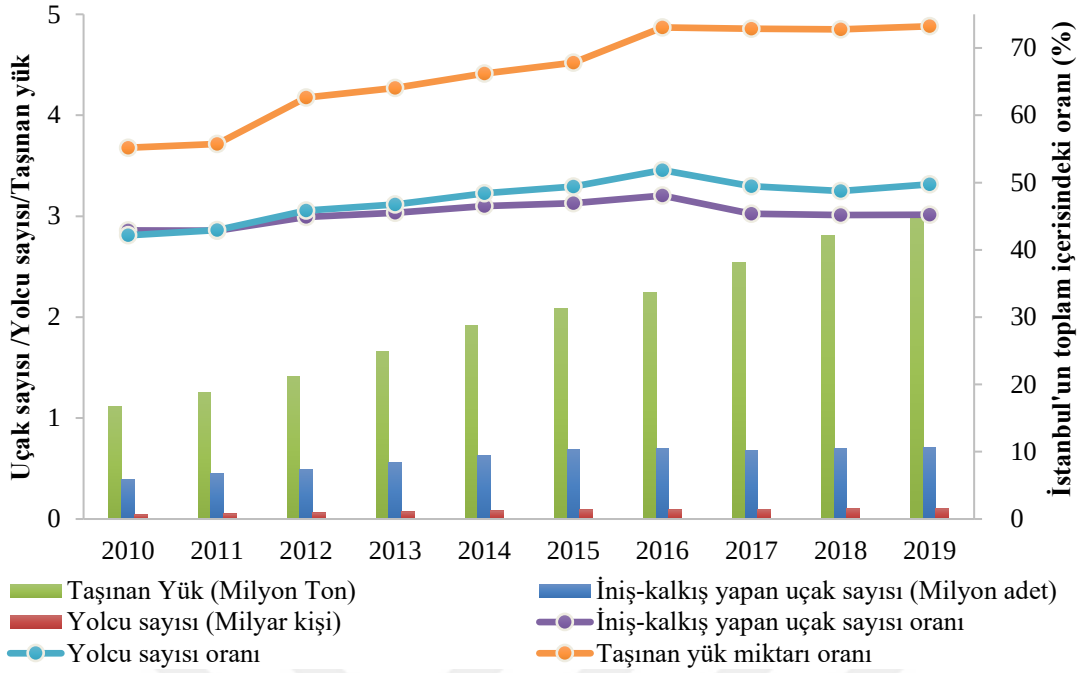
Şekil 3.11 : 2019 yılı İstanbul'daki motorlu kara taşıtlarının türlerine göre dağılımı (TÜİK, 2021c).

1.716 km otoyollar, 4.023 km ana arterler, 30.400 km kent için yollar ve 16 km uzunluğunda tüneller İstanbul karayolu ağını oluşturmaktadır. Karayolu kapasitesinin artırılması ve trafik tıkanıklığının hafifletilmesi amacıyla karayolu ağının genişletilmesine yönelik projeler devam etmektedir (İBB, 2018).

3.2.3 Havayolu ve denizyolu ulaşımı

Asya, Avrupa ve Ortadoğu'nun kesiştiği bir noktada yer alan İstanbul, stratejik coğrafi konumu sebebiyle dünyanın en önemli havacılık merkezlerinin arasında yer almaktadır. 2018 verilerine göre son on yılda dünya çapında %5,6 oranında büyüyen havayolu sektörü Türkiye'de %14 büyümeye kaydetmiş olup, bu büyümede en önemli katkıyı İstanbul sağlamıştır (İstairport, 2021).

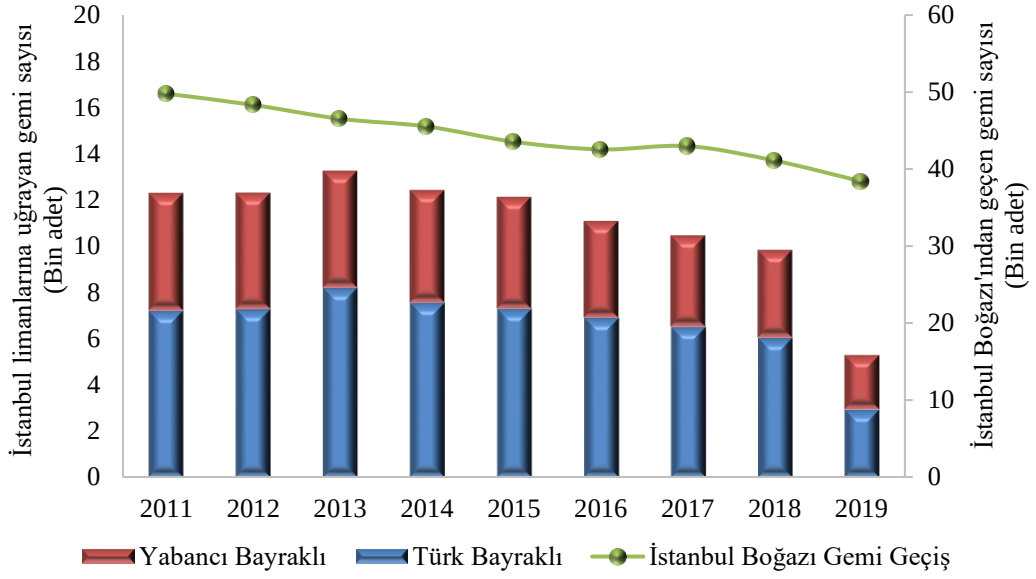
İstanbul'un her iki yakasında birer adet havalimanı bulunmaktadır. 1900'lü yılların başından itibaren ülkemizde ilk havayolu ulaşımının başlatıldığı Atatürk Havalimanı Nisan 2019 itibariyle sivil uçuşlara kapatılmış olup, yerine yine Avrupa Yakası'nda yapımı tamamlanan İstanbul Havalimanı faaliyetine başlamıştır (Url-3). Anadolu Yakası'nda bulunan Sabiha Gökçen Havalimanı ise 2001 yılında hizmete açılmıştır. Yaklaşık %67'si Avrupa Yakası'na olmak üzere her iki havalimanına 700 binden fazla uçak iniş kalkış yapmaktadır. İstanbul ili havayolu ulaşım verileri Şekil 3.12'de görülmektedir (TÜİK, 2021c).



Şekil 3.12 : İstanbul havayolu ulaşım istatistikleri (TÜİK, 2021c).

Ülke genelinde iniş-kalkış yapan uçak sayısının %45'i, yolcu sayısının %50'si ve taşınan yükün %73'ü İstanbul'da bulunan havalimanlarında gerçekleşmektedir. İnış-kalkış yapan uçak sayısı 2010 yılından beri %79 artış göstermiş olup, bu değer yolcu sayısı ve taşınan yük için sırasıyla %139 ve %169'dur. 2019 yılı uçuşlarının %66'sını uluslararası dış hat uçuşları oluşturmuştur.

Türk Boğazları, Karadeniz'i Akdeniz'e bağlayan tek su yolu olması sebebiyle stratejik bir öneme sahip olup, Karadeniz ülkelerini dünya piyasalarına bağlayan ana ticaret güzergahı olmaktadır (MFA, 2021). Bu kapsamda, her yıl binlerce geminin geçiş yaptığı İstanbul Boğazı, Çanakkale Boğazı ile birlikte kritik öneme sahiptir. Ayrıca, ülkelerin ticari anlamda giriş-çıkış kapıları olarak nitelendirilen limanlar da deniz taşımacılığı ve ulaşımında diğer önemli bileşenleri oluşturmaktadır. Ülkemizde ticari ulaştırmanın ana noktası olan İstanbul'da yer alan Ambarlı, İstanbul, Silivri, Tuzla ve Şile limanları ile İstanbul Boğazı gemi geçiş istatistikleri Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13 : İstanbul denizyolu ulaşım istatistikleri (DGM, 2021).

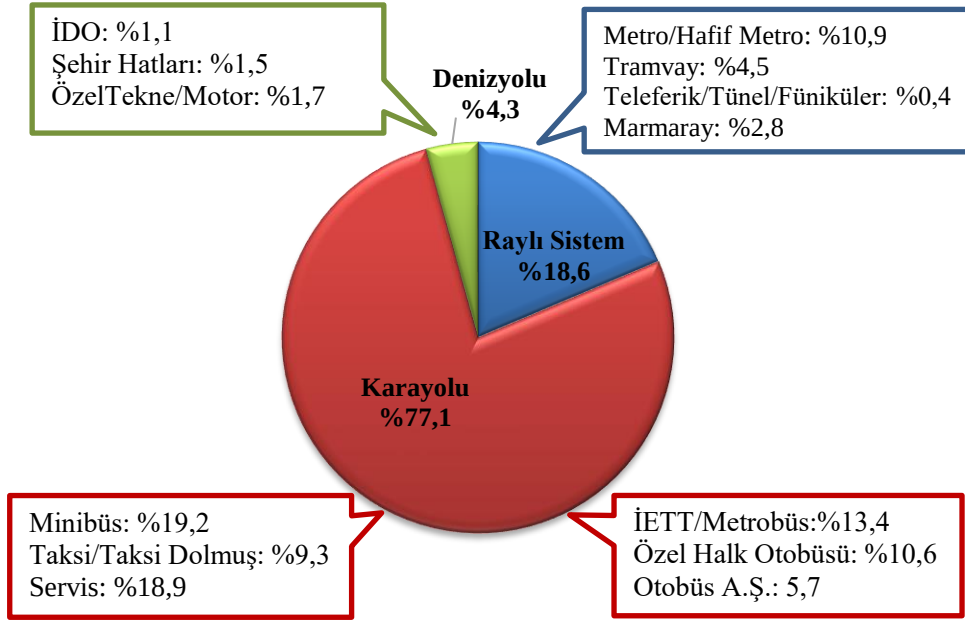
2019 yılında %56'sı Türk bayraklı olmak üzere İstanbul limanlarına toplamda 5264 gemi uğramış olup; bu değer bir önceki yıla göre %46, 2011 yılına göre %54 oranında azalma göstermiştir. Öte yandan, İstanbul Boğazı'ndan 38,4 bin gemi geçişi olmuştur. Boğazlardan geçiş yapan gemi sayısı 2010 yılına göre %25 oranında azalmıştır (DGM, 2021).

Gemi geçiş sayılarındaki azalmanın sebebinin, yaşanan küresel ekonomik krizler, gemi boyutlarının büyümesi ve Bakü-Tiflis-Ceyhan petrol boru hattının devreye girmesi olarak düşünülmektedir (Url-4).

İstanbul'un toplu ulaşımında da etkili olan denizyolu ulaşımı, bir sonraki bölümde ele alınmıştır.

3.2.4 Toplu Ulaşım

Nüfus yoğunluğun ve kentiçi hareketliliğin fazla olması sebebiyle İstanbul'da toplu ulaşım özellikle trafik tıkanıklığının azaltılması açısından büyük önem arz etmektedir. İstanbul'da toplu ulaşım otobüs, metrobüs, minibus, taksi, dolmuş, servisler, metro, tramvay, teleferik, föniküler, Marmaray, yolcu vapurları ve deniz otobüsleri ile sağlanmaktadır. Toplu taşımada en yüksek pay %77,1 ile karayoluna aittir. Bu oranı sırasıyla %18,6 ile raylı sistem ve %4,3 ile denizyolu ulaşımı izlemektedir (İETT, 2021) (Şekil 3.14). Son beş yılda karayolunu kullanan yolcu sayısı %25 artış gösterirken, raylı sistemler yolcu sayısı %67 ve deniz ulaşımı yolcu sayısı %46 artmıştır (İBB, 2021).



Şekil 3.14 : Günlük yolcu sayısının yolculuk türleri bazında dağılımı (İETT, 2021).

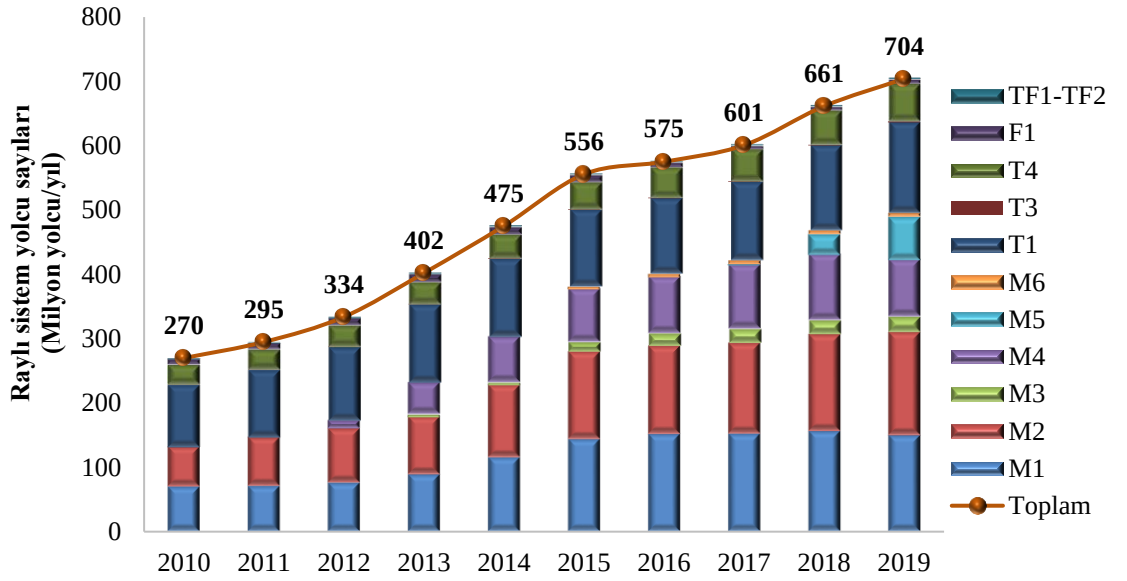
Toplu taşımada en yüksek orana sahip karayolunda ulaşım 66.269 servis aracı, 17.395 taksi, 572 dolmuş, 6.460 minibüs, 3.030 İETT, 2.154 özel halk otobüsü ve 985 Otobüs A.Ş. otobüsü ile sağlanmaktadır (Tuhim, 2021).

Toplu taşımada en yüksek ikinci paya sahip olan raylı sistem ulaşım hatlarına ilişkin bilgiler Çizelge 3.1’de verilmiştir (Marmaray, 2021; Metroİstanbul, 2020).

Çizelge 3.1 : İstanbul raylı sistem ulaşım hat bilgileri (Marmaray, 2021; Metroİstanbul, 2020).

Hat Kodu	Hat Adı	Hat Uzunluğu (km)	İstasyon Sayısı
M1	Yenikapı-Havalimanı/Kirazlı Metro	26,8	23
M2	Yenikapı-Hacıosman Metro	23,49	16
M3	Kirazlı-Olimpiyat- Başakşehir Metro	15,9	11
M4	Kadıköy-Tavşantepe Metro	26,2	19
M5	Üsküdar-Çekmeköy Metro	20	16
M6	Levent-Boğaziçi Ü./Hisarüstü Metro	3,3	4
T1	Bağcılar-Kabataş Tramvay	19,3	31
T3	Kadıköy-Moda Tramvay	2,6	10
T4	Topkapı-Mescid-i Selam Tramvay	15,3	22
F1	Taksim-Kabataş Füniküler	0,64	2
TF1	Maçka-Taşkışla Teleferik	0,3	2
TF2	Eyüp-Piyerloti Teleferik	0,42	2
Marmaray	Gebze-Halkalı Tren	76,6	43

Marmaray dışında kalan diğer raylı sistem hatlarında 2019 yılında toplamda 1.764.292 sefer gerçekleştirilmiştir (İBB, 2021). Bu hatlarda taşınan yıllık yolcu sayısının değişimi Şekil 3.15'te verilmiştir. Raylı sistemleri kullanan yıllık toplam yolcu sayısı 2019 yılında 2010 yılına göre 2,6 kat artış göstermiştir. Yıllar itibariyle yolcu sayısında azalma gerçekleşen tek hat F1-Taksim-Kabataş Füniküler Hattı olup, M2-Yenikapı-Hacıosman Metro ve M1-Yenikapı-Havalimanı/Kirazlı Metro hatları sırasıyla %158 ve %114 artış ile yıllar geçtikçe en çok tercih edilen hatlar olmuştur (Metroİstanbul, 2019).

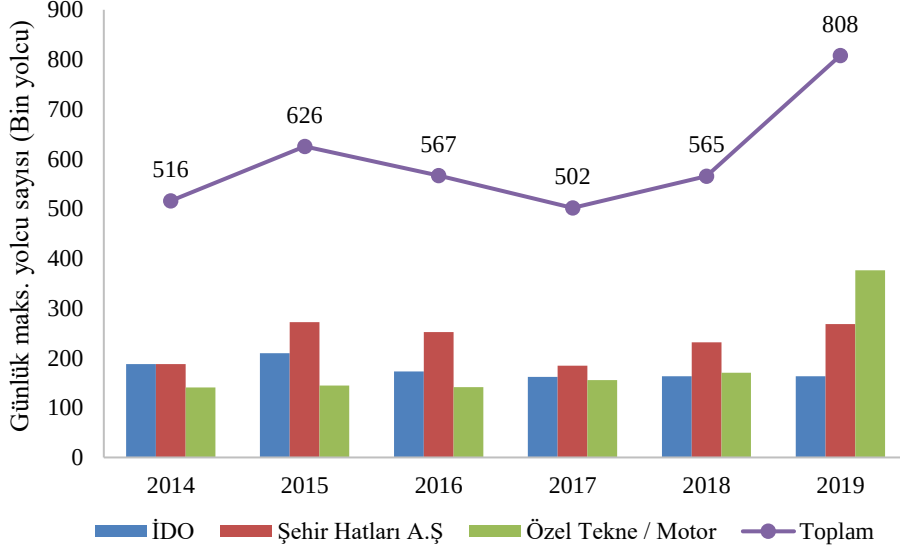


Şekil 3.15 : Raylı sistem hatlarının yıllara göre yolcu sayısı (Metroİstanbul, 2019).

İstanbul'da halihazırda yürütülmekte olan çok sayıda raylı sistem projesi bulunmaktadır. İlerleyen dönemlerde yapımı tamamlanarak hizmete girecek olan raylı sistemler Avrupa Yakası'nda; Kabataş -Mecidiyeköy - Mahmutbey Metro Hattı, Eminönü-Alibeyköy Tramvay Hattı, İkitelli-Ataköy Metro Hattı, Rumeli Hisarüstü - Aşiyan Füniküler Hattı, Bağcılar-Halkalı Metro Hattı, Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metro Hattı, Anadolu Yakası'nda ise Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli, Ümraniye-Ataşehir-Göztepe, Dudullu-Bostancı ve Kaynarca-Pendik-Tuzla metro hatlarıdır (İBB, 2021).

İstanbul'da toplu denizyolu ulaşımı özel tekne ve motor kullanımının yanı sıra İDO (İstanbul Deniz Otobüsleri) ve Şehir Hatları A.Ş. işletmeleri tarafından gerçekleştirilmektedir. Mevcut durumda İDO 52 gemi/motor, 15 hat ve 35 iskele ile hizmet verirken; bu veriler Şehir Hatları A.Ş. için 58 gemi/motor, 21 hat ve 80 iskele,

özel tekne/motorlar için ise 394 gemi/motor, 17 hat ve 30 iskele şeklindedir. İDO, Şehir Hatları A.Ş. ve diğer özel tekne/motorlara ait günlük maksimum yolcu sayılarının yıllar itibariyle değişimi Şekil 3.16’da verilmiştir.

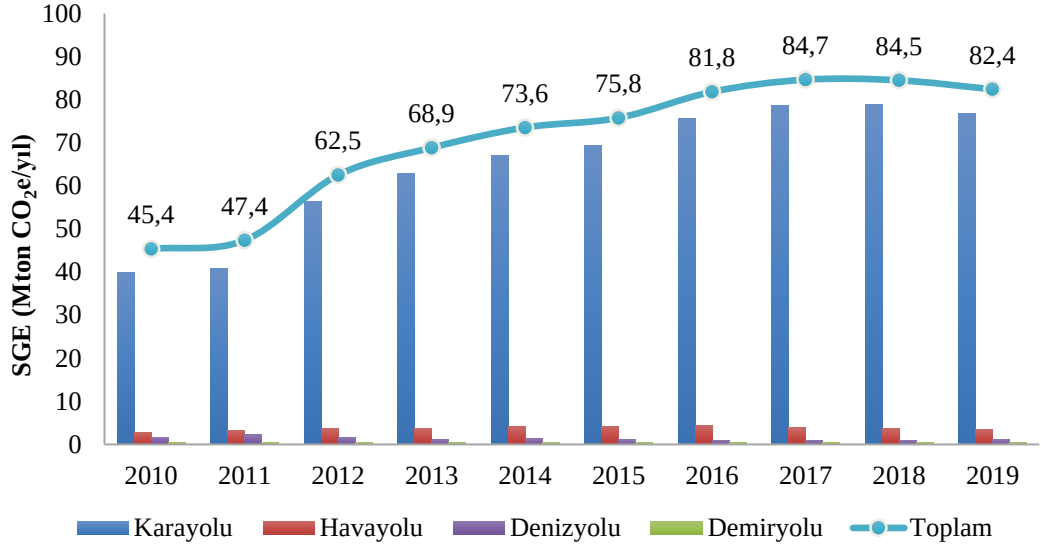


Şekil 3.16 : Deniz ulaşımı günlük yolcu sayılarının değişimi (İBB, 2021).

2019 yılı için sırasıyla deniz ulaşımı günlük maksimum yolcu sayıları İDO, Şehir Hatları A.Ş. ve diğer özel tekne/motorlar için 163.434, 268.443 ve 376.401 şeklindedir. 2019 yılında özel tekne ve motorlu yolculuk sayısı yaklaşık %47 oranında olup, bu değer önceki yıllarda %25-30 arasında olmuştur (İBB, 2021).

3.3 Ulaştırma Sektörü Sera Gazı Emisyonları

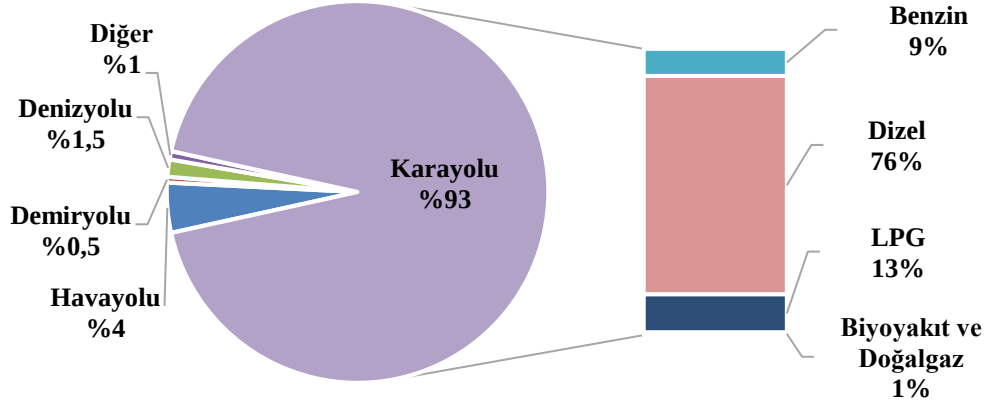
Ulaştırma sektörü kaynaklı toplam sera gazı emisyonları ulusal sera gazı emisyon envanterlerinde enerji sektörü altında değerlendirilmektedir. Enerji sektörü kaynaklı emisyonların %23’ünü ve tüm sektörleri kapsayan toplam emisyonların %16,3’ünü oluşturan ulaştırma sektöründen kaynaklı sera gazı salımlarının yıllara göre değişimi Şekil 3.17’de görülmektedir.



Şekil 3.17 : Ulaştırma sektörü sera gazı emisyonlarının yıllara göre değişimi (TÜİK, 2021a).

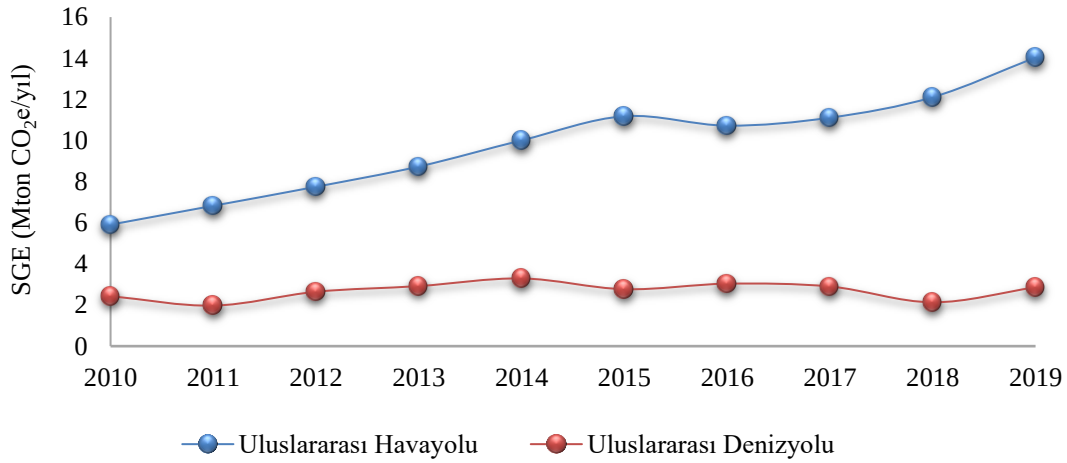
Yıllara sari olarak artış eğiliminde olan sektör kaynaklı emisyon miktarı, 2019 yılında bir önceki yıla göre %2,5 oranında azalmıştır. Öte yandan, 2010 yılına göre sera gazı salımlarında yaklaşık %82 gibi önemli bir artış söz konusudur. Alt kategori bazında bakıldığında %92 ile karayolu kaynaklı sera gazı emisyonları en fazla artışı göstermiş, %23 ile havayolu takip etmiştir. Demiryolu ve denizyolu kaynaklı sera gazı emisyon miktarında ise sırasıyla %23 ve %28 azalma olmuştur (TÜİK, 2021a).

2019 yılı için ulaştırma sektörü sera gazı emisyonlarının alt kategori bazında dağılımı Şekil 3.18’de verilmiştir. Veriler incelendiğinde karayolu kaynaklı emisyonların %93 ile en yüksek paya sahip olduğu, ardından %4 ile havayolu ulaşımının geldiği görülmektedir. 2019 yılı için salınan karayolu kaynaklı toplam sera gazı emisyonunun (Şekil 3.18) %76’sı dizel, %13’ü LPG ve %9’u benzin yakıtlı araçlardan kaynaklanmaktadır. Yakıtlara göre sera gazı dağılımına bakıldığında büyük çoğunluğu dizel yakıtlardan kaynaklanmakta, ikinci sırada LPG yer almaktadır (TÜİK, 2021a).



Şekil 3.18 : 2019 yılı ulaştırma sektörü sera gazı dağılımı (TÜİK, 2021a).

Uluslararası havayolu ve denizyolu taşımacılığına ilişkin emisyon değerleri ulusal sera gazı emisyon envanterine dahil edilmemekte olup, yıllara sari sera gazı emisyon miktarlarındaki değişim Şekil 3.19’da verilmiştir. Buna göre, 2010 yılından bu yana uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımı kaynaklı sera gazı salımları sırasıyla %138 ve %18 artış göstermiştir (TÜİK, 2021a).



Şekil 3.19 : Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımı sera gazı emisyonlarının yıllara göre değişimi (TÜİK, 2021a).

2019 yılı için İstanbul’un toplam sera gazı emisyonu yaklaşık 51 milyon ton CO₂e olup, hesaplanan toplam emisyonun %28’ini ulaştırma sektörü oluşturmaktadır (İklim.İstanbul, 2021).

4. PLAN VE POLİTİKALAR

Ulaştırma sektörü, önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi sera gazı salımlarında önemli bir paya sahip olup, sektör kaynaklı sera gazı emisyonları gün geçtikçe artış göstermektedir. Bu sebeple, sektörün hem iklim değişikliğine etkilerinin minimize edilmesi, hem de iklim değişikliğine adaptasyonu noktasında gerekli stratejileri içeren plan ve politikaların oluşturulması ve yasal düzenlemelerin yapılması büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, İstanbul'a özgü düzenlemelerin yanı sıra ülkemizde yayımlanmış olan çok sayıda eylem planı, yasal mevzuat ile plan ve politika belgesi mevcuttur.

2019-2023 yıllarını kapsayan Onbirinci Kalkınma Planı'nda lojistik ve ulaştırma sektörüne yönelik; kaynakların daha etkin kullanılması, enerji verimliliğinin artırılması, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir liman uygulamaları, karayolu kapasitesinin etkin kullanımını sağlayan Akıllı Ulaşım Sistemlerinin uygulanması, demiryolu ulaşımının artırılması gibi çok çeşitli politika ve tedbirler yer almaktadır. Ayrıca çevre ve doğal kaynakların korunması amacıyla, ulaştırma sektörü de dahil olmak üzere sera gazı emisyonuna sebep tüm sektörlerde emisyon kontrolüne yönelik çalışmalar yürütüleceği belirtilmektedir (SBB, 2019).

Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) altyapısının geliştirilmesi, sürdürülebilir akıllı hareketliliğin sağlanması, yol ve sürüş güvenliğinin sağlanması, yaşanabilir çevre ve bilinçli toplum oluşturulması ile veri paylaşımı ve güvenliğinin sağlanmasını amaçlayan Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi ve 2020-2023 Eylem Planı ile yakıt tüketimi ve emisyonların azaltılması gibi eylemlerin hayata geçirilmesi hedeflenmektedir. Özellikle yaşanabilir çevre ve bilinçli toplum oluşturulması stratejik amacı altında; toplu taşıma filolarında ve hizmet araçlarında elektrikli araçların kullanılması ve toplu taşımanın teşvik edilmesi, yakıt tüketimi ve emisyonların azaltılması için elektrikli taşıt ve şarj istasyonu ile ilgili mevzuat çalışmalarının yapılması ve bisiklet kullanımının yaygınlaştırılması gibi önemli eylemleri içermektedir (UAB, 2020b).

2020-2023 Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planı; etkin akıllı şehir ekosistemi oluşturulması, akıllı şehir dönüşüm kapasitesi artırılması, akıllı şehire dönüşümde kolaylaştırıcı ve yönlendirici ortam oluşturulması ve şehircilik hizmetlerinde akıllı şehir dönüşümü sağlanması stratejik amaçlarına hizmet etmektedir. Bu amaçlara ulaşmak için tanımlanan hedefler ve bu hedeflere yönelik eylemlerde ulaştırma sektörüne yönelik birçok husus yer almaktadır. Bu kapsamda; ulaşım sistemlerinin verimli ve çevreye duyarlı şekilde kullanımının sağlanması, ulaşım araçlarının çevre kirliliğine olan etkisinin azaltılması, düşük yakıt tüketimli ve elektrikli araçlar ile ülke ekonomisine katkı sağlanması, toplu taşıma sistemlerinin çevre duyarlı hale getirilmesi, kent içi ulaşım, yaya ulaşımı ve bisiklet kullanımının geliştirilmesi gibi uygulamalar beklenen faydalar arasında yer almaktadır (ÇŞB, 2019).

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın 2019-2023 Stratejik Planı'nda tüm ulaşım modlarının bütüncül bir yaklaşımla entegrasyonunu sağlayacak ulaşım altyapılarının planlı bir şekilde gerçekleştirmesi amaçlanmaktadır. Demiryolu ağının ve kent içi raylı sistemlerin yaygınlaştırılması, kentiçi ulaşım altyapısının geliştirilmesi, İstanbul Boğazı'nın trafik yükünün azaltılması hedeflenmektedir (UAB, 2019).

Küresel iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılması ve bu etkilere uyum sağlanması noktasında, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan Ulusal İklim Değişikliği Strateji Belgesi (İDES) ve kısa, orta ve uzun vadede sektörel sera gazı emisyon kontrolü stratejilerini; İklim Değişikliği Eylem Planı (İDEP) ise sektörel amaç ve bu amaca hizmet eden hedef ve eylemlerini içermektedir. İDES'te ulaştırma sektörüne ilişkin orta vadeli stratejiler; yük ve yolcu taşımacılığında demiryolu, denizyolu ve havayolunun payının ve kapasite kullanım oranının artırılması, şehirlerde bisiklet gibi çevre dostu ulaşım araçlarının kullanımının yaygınlaştırılmasına ve yaya ulaşımına imkan veren düzenlemelerin özendirilmesi, özellikle büyükşehirlerde metro ve hafif raylı sistemler ile toplu taşıma sistemlerinin yaygınlaştırılması, kentlerde kullanılan toplu taşıma araçlarında alternatif yakıt ve temiz araç teknolojilerinin yaygınlaştırılması, ulaşımında enerji verimliliğini artıracak uygulamaların geliştirilmesi, alternatif yakıt, CO₂ ve NO_x emisyonlarını en aza indirilebilen yeni teknoloji ürün motorların ve hibrit gibi çevre dostu ulaşım araçların kullanımının yaygınlaştırılması olarak sıralanmaktadır (ÇŞB, 2010).

İDEP'te ulaştırma sektörüne yönelik öne çıkan hedef ve eylemler ise demiryollarının yük ve yolcu taşımacılığındaki payının artırılması, akıllı ulaşım sistemlerinin

geliştirilmesi, Ulaştırma Ana Planı hazırlanması ve uygulamaya konması kapsamında ulaştırma sektöründe sera gazı emisyonlarının sınırlandırma seçeneklerinin, azaltım potansiyellerinin ve maliyetlerinin hesaplanması ve ileriye yönelik projeksiyonların yapılması, toplu taşıma hizmetinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi, bisiklet ve yaya ulaşımının geliştirilmesi ve iyileştirilmesi, 2023 yılına kadar alternatif yakıt ve temiz araç kullanımını arttırmaya yönelik yasal düzenlemelerin yapılması ve kapasitenin geliştirilmesi ile ulaşımда enerji tüketiminin sınırlandırılması şeklindedir (ÇŞB, 2011).

2017-2023 Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı'nda ulaştırma sektörü için; enerji verimli araçların özendirilmesi, alternatif yakıt kullanan ve/veya yeni teknolojili araçların yaygınlaştırılması, bisikletli ve yaya ulaşımının geliştirilmesi ve iyileştirilmesi, şehirlerdeki trafik yoğunluğunun azaltılması kapsamında otomobil kullanımının azaltılması gibi eylemler yer almaktadır (ETKB, 2017). Ayrıca, Ulaşımда Enerji Verimliliğinin Artırılmasına İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmelik (2019), ulaşımда enerji verimliliğinin artırılması amacıyla; motorlu araçların birim yakıt tüketimlerinin düşürülmesine, araçlarda verimlilik standartlarının yükseltilmesine, çevreci alternatif yakıt kullanımının teşvik edilmesine, hava kirleticileri ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına, toplu taşımacılığın yaygınlaştırılmasına, akıllı ulaşım sistemlerinin etkin uygulanmasına, sürdürülebilir şekilde ulaşım altyapılarının iyileştirilmesine ve kentsel ulaşım planlarının hazırlanmasına ilişkin usul ve esasları kapsamaktadır.

İstanbul Metropolitan Alanı Kentsel Ulaşım Ana Planı, 2011 yılında İstanbul Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Daire Başkanlığı tarafından yayınlanmıştır. Plan çerçevesinde İstanbul için sürdürülebilir bir ulaştırma sistemi kurularak kentte yaşayanların ulaşım taleplerinin karşılanması amaçlanmaktadır. Gelecekte motorlu araç trafiğinin azaltılması, toplu taşıma altyapısının iyileştirilmesi ve trafik talebinin özel araçlardan toplu taşıma araçlarına teşvik edilmesi planın ana hedefleri arasında yer almaktadır (İBB, 2011).

2018 yılında tamamlanan İstanbul İklim Değişikliği Eylem Planı, İstanbul'u iklime dirençli hale getirmeyi amaçlamakta olup, sera gazı emisyon azaltımı ve iklim değişikliğine uyuma yönelik hedefler içermektedir. Bu kapsamda sera gazı salımlarında 2030 yılında artıştan %33 azaltım öngörülmekte, iklime direncin arttırılması amacıyla altyapı ve sosyo-ekonomik sistemler gibi kırılgan unsurların

güçlendirilmesi hedeflenmektedir. Ulaştırma sektörü kaynaklı sera gazı azaltım eylemlerinin başında raylı sistem hat uzunluğunun arttırılması gelmektedir. Raporda yer verilen diğer bazı azaltım eylemleri şu şekildedir (İBB, 2018):

- Bisiklet ve elektrikli araçların park ve şarj imkanlarının artırılması, mevcut yolların bisikletlere uygun hale getirilmesi, ulaşım amaçlı yeni bisiklet altyapısının oluşturulması,
- Yaya ulaşımının özendirilmesi yoluyla karayolu emisyonlarının azaltılması,
- Belediyenin elektrikli ve hibrid araçlara ve güneş enerjisine geçişinin sağlanması,
- Kent içi araç park yerlerinin artırılması ve etkin kullanımı, park ihlallerinin denetimini güçlendirecek teknik işbirliği mekanizmaları geliştirilmesi,
- Toplu taşıma araçlarındaki bisiklet taşıma ve engelli kullanım imkanlarının geliştirilmesi,
- Akıllı ulaşım sistemlerinin yaygınlaştırılması,
- Yol kalitesinin ve etkin kullanımının artırılması,
- Toplu taşımanın etkinleştirilmesi, metro ve metrobüs hatlarının yaygınlaştırılması,
- Ulaşım hatlarının ağaçlandırılarak yutak alanlara dönüştürülmesi.

Hem ulusal hem de kent ölçeğinde belirlenmiş plan ve politikalar incelendiğinde sera gazı emisyon miktarının azaltılması noktasında; elektrikli ve hibrit araçların yaygınlaştırılması, toplu ulaşımın etkinleştirilmesi, bisiklet kullanımının arttırılması, raylı ulaşım hatlarının arttırılması ve akıllı ulaşım sistemleri gibi hedef ve eylemlere öncelik verildiği görülmektedir.

Öte yandan, dünya ülkelerinde de benzer seçenekler ele alınmakta ancak bunlara ek olarak karbon vergisi ya da fosil yakıtlı araçların kullanımının sınırlandırılması gibi köklü değişikliklere gidilmektedir. Karbon fiyatlandırması, karbondioksit emisyonlarına bir ücret veya bir üst sınır getirerek atmosfere salınan karbondioksit miktarını azaltmayı amaçlamaktadır. Ulaştırma sektörü için karbon fiyatlandırması genellikle yakıtlarının yakılması için geçerli olup; yakıt fiyatlarını yükselterek daha temiz araçların (elektrikli araçlar gibi) ve alternatif seyahat yöntemlerinin (toplu

taşıma gibi) kullanılmasını teşvik etmektedir. Karbon vergileri, diğer birçok enerji tasarrufu ve emisyon azaltma stratejisinden daha fazla toplam fayda sağlama eğilimindedir, çünkü aynı zamanda daha az trafik sıkışıklığı, yol ve park maliyetleri ve kazalar gibi yan faydalar da sağlamaktadır. Bir karbon fiyatının yakıt ekonomisi değişimi üzerindeki etkisi, seçilen karbon fiyatının katılığı (vergi oranı veya tavan seviyesi) ve araç filosunun bileşimi dahil olmak üzere birçok faktöre bağlı olmaktadır. Karbon fiyatı ne kadar yüksek olursa, yakıt ekonomisi değişimini o kadar fazla etkilemektedir (RFF, 2020). Mevcut durumda, küresel sera gazı emisyonlarının %5,6'sını temsil eden ve aralarında Arjantin, Şili, Kanada, Danimarka, Fransa, Letonya, Norveç, Polonya, Birleşik Krallık ve Japonya'nın da bulunduğu 32 ülke karbon vergisi uygulamaktadır (WB, 2020). İsveç 139 ABD\$/tCO_{2e} ile en yüksek karbon vergisini uygulayan ülke olup, 101 ABD\$/tCO_{2e} ile İsviçre ve 77 ABD\$/tCO_{2e} ile Finlandiya takip etmektedir. Norveç, Fransa, İzlanda ve Danimarka için karbon vergileri sırasıyla 64, 55, 36 ve 29 ABD\$/tCO_{2e}'dir. Portekiz, Şili, Estonya, Polonya gibi ülkelerde ise karbon vergileri 10 ABD\$/tCO_{2e} altındadır (WB, 2018b).

Diğer bir yandan ülkeler düşük karbonlu ekonomiye geçiş sürecinde yüksek emisyonla sahip dizel ve benzinli araçların üretimini ve satışını yasaklama kararı almaya devam etmektedir. Mevcut durumda 31 ülke bu konuda sınırlama getirmiş olup, uygulamanın başlayacağı yıllar ve kapsamı farklılık göstermektedir. Slovenya, İzlanda, Hollanda, Danimarka, İsveç, Almanya, Hindistan gibi ülkeler 2030 yılında yeni araç satışlarına yasak getirirken, Japonya 2035 yılında, Fransa, İspanya, Portekiz ve Mısır 2040 yılında başlayacak şekilde yasak getirmiştir (CleanTechnica, 2021). Ayrıca, AB hava kalitesi standartlarını karşılamak ve hava kirliliğine maruziyeti azaltmak amacıyla özellikle dizel gibi yüksek kirliliğe sebep olan araçların girişini yasaklayan Düşük Emisyon Bölgeleri (LEZ-Low Emission Zones) de halihazırda birçok Avrupa Birliği ülkesinde yaygınlaşmaktadır. LEZ gereklilikleri ağır araçlar, hafif hizmet araçları veya hem hafif hem de ağır araçlar için geçerli olabilmektedir. Çoğu LEZ, yılda 365 gün, günde 24 saat çalışmakta ve bu bölgeler kamera sistemleriyle ya da manuel olarak, genellikle ön cam çıkartmaları ile birlikte uygulanmaktadır. Belçika, Çek Cumhuriyeti, Danimarka, Almanya, Yunanistan, İtalya, Norveç, Portekiz ve İsveç düşük emisyon bölgelerine sahip ülkelerden bazılarıdır (DieselNet, 2015).



5. SERA GAZI EMİSYONU DEĞERLENDİRMESİNDE KULLANILAN YAKLAŞIMLAR

5.1 IPCC Metodolojisi

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), sera gazı envanteri hesaplamalarını enerji, endüstriyel işlemler, tarım ve atık gibi sektörler altında gruplandırmıştır. Enerji başlığı altında, mobil kaynakların neden olduğu emisyonlar bölümünde ele alınmakta olan ulaştırma sektöründe, sektöre bağlı olmaksızın bütün ulaştırma faaliyetlerinde kullanılan yakıtların yakılması ve buharlaşmasından kaynaklanan emisyonlar hesaplanmaktadır. Enerji sistemlerindeki emisyonlar, yakıtın yanmasından kaynaklanan emisyonlar ve kaçak emisyonlar olmak üzere ikiye ayrılmakta olup, bu kapsamda CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, CO ve NMVOC ile beraber SO₂ emisyonu gibi doğrudan ve dolaylı sera gazı özelliği içeren emisyonlar hesaplanmaktadır. Özellikle CO₂ gazı doğrudan yakıtın yakılmasıyla ilişkili olup, yakıtın ne kadar verimli yakıldığının bir göstergesidir. Öte yandan diğer gazların hesabında daha detaylı bilgiye gerek duyulmaktadır. Yanma koşulları, teknolojisi, emisyon standartları, yakıt karakteristikleri gibi çeşitli faktörlerin bilinmesi gerekmektedir. Bu aşamada “Tier” kavramları ön plana çıkmaktadır.

Emisyon hesaplama metodları “Tier” şeklinde ifade edilen çeşitli seviyede bölümlere ayrılmıştır. Burada seviyeyi belirleyen faaliyet ve teknoloji detaylarıdır. Tier 1 metodu genel olarak daha az veri içeren basit bir yöntemken, Tier 3 metodu ise daha karmaşık olan ve uzmanlık gerektiren bir yöntemi ifade etmektedir (IPCC, 2006; Pekin, 2006).

Tier 1 yaklaşımında tüm yanma kaynaklarından çıkan emisyonlar, tüketilen yakıt miktarları ve ortalama emisyon faktörleri temelinde tahmin edilmektedir.

Tier 2 ve Tier 3 yaklaşımında ise emisyon tahminleri, sabit ve mobil kaynakları kapsayan ayrıntılı yakıt/teknoloji bilgilerine dayanmaktadır. Tier 2 ve 3 arasındaki farkı belirlemek zordur, çünkü emisyon hesaplarının iyileştirilmesi aşamasında bir yaklaşımdan diğerine geçilmiştir. Genel olarak Tier 2 yaklaşımıyla, ülkeye özgü karbon içeriklerini ele alan uygun emisyon faktörleri kullanılacak şekilde yakıt tüketim gruplarını ayırmak amaçlanmaktadır. Tier 3 aşamasında ise yakıt tüketim

değerlerinden farklı olarak araçların yaptıkları yol uzunluğu veya ton-km biriminde taşınan yük değeri gibi unsurlar hesaba katılarak, bunlara uygun emisyon faktörleri yardımıyla hesaplama yapılmaktadır (IPCC, 1996). Ülkemizde ve dünyada IPCC hesaplama metodolojisi kullanılarak yapılmış çok sayıda çalışma olup, örnek bazı çalışmalar aşağıda açıklanmıştır.

Bu kapsamda, Tier metodolojisi kullanılarak yürütülmüş olan bir tez çalışmasında ulaştırma sektörü nedeniyle açığa çıkan sera gazlarından özellikle CO₂'nin analizi üzerinde durulmuş; ayrıca, NO_x, CO, CH₄, VOC, N₂O ve SO₂ gazları da hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular ışığında, karayolu taşıt parkında bulunan eski model araçların trafikten çekilmesi, daha az yakıt tüketen ve emisyon regülasyonuna uygun araçların parka eklenmesi, alternatif enerji kaynaklarının kullanılması, toplu taşıma araçlarının kullanımının artması, karayolu dışında alternatif ulaşım gruplarının kullanılması, trafik akımının düzenlenmesi, yakıt tüketimlerine göre vergilendirmeye gidilmesi ve araç performanslarının iyileştirilmesini sağlayacak yasal düzenlemeler getirilmesi ile özellikle karayolu kaynaklı emisyonlarda belirgin bir iyileşme sağlanacağı sonucuna varılmıştır (Pekin, 2006).

2008 yılında tamamlanan diğer bir tez çalışmasında ise toplu taşıma türlerinin İstanbul kent içi ulaşımındaki payları incelenmiş ve yapımı sürmekte olan Marmaray projesinin, çeşitli senaryolar altında, karayolu ulaşımı kaynaklı sera gazı emisyonlarını azaltıcı etkisi değerlendirilmiştir. Yapılan hesaplamalarda Tier 2 ve Tier 3 yaklaşımları kullanılmıştır (Topçu, 2008)

Kore'de yürütülen bir çalışmada IPCC Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 hesaplama yöntemleri kullanılarak elde edilen karayolu kaynaklı sera gazı emisyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Tier 1'e göre 728.857 ton CO₂e/yıl olarak hesaplanan ortalama sera gazı emisyon miktarı, Tier 2 ve Tier 3'e göre sırasıyla 864.757 ton CO₂e/yıl ve 661.710 ton CO₂e/yıl olarak elde edilmiştir. Tier 3 sonuçları, Tier 1 ve Tier 2 sonuçlarından %10,1 ve %20,7 daha az tahmin edilmiş olup, çalışma sonucunda Tier 2 yöntemiyle elde edilen SGE sonuçlarının daha makul olduğu değerlendirilmiştir (Kim ve diğ., 2011).

Rusya'da 2050'ye kadar karayolu taşımacılığının enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları, IPCC metodolojisi (Tier 1–3) yanı sıra EMEP/EEA ve diğer yöntemleri kullanarak farklı senaryolar altında tahmin edilmiş, Rusya ekonomisi ve

taşımacılığının düşük karbonlu bir kalkınma yoluna geçmesi halinde, araç filosunun karbondan arındırılmasının 2054'ten sonra gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır (Trofimenko ve diğ., 2020).

5.2 Ulaşım modellemesi

Ulaştırma sektörü kaynaklı sera gazı emisyonlarının belirlenebilmesi için öncelikle ulaştırma sektörü talebinin geleceğe yönelik olarak tahmin edilmesi gerekmektedir. Temelde ulaşım modellemesi olarak da bilinen bu çalışmalar, ülkemizde de kentsel ulaşım planlaması adı altında yürütülmektedir. Ulaşım modellemesi, yöneylem araştırması yöntemlerinin büyük uygulamalarından biri olup, birçok tekniği kullanarak farklı ulaşım sistemlerinin planlanmasında temel oluşturmaktadır.

Ulaşım modellemesi ile gerçekleştirilmek istenen temel amaç; gelecekteki arazi kullanımı yapısına bağlı olarak kentte oluşması beklenen ulaşım taleplerinin belirlenebilmesi için stratejik düzeyde planlama çerçevesinin ve bu talepleri karşılayacak araçların oluşturulması veya bu kapsamda önerilen projelerin kentin ulaşım sistemi üzerindeki etkilerinin ortaya konulmasıdır (DLH, 2015). Günümüzde bu doğrultuda kullanılan modeller erişebilirlik, makro-ekonomik etki, çevresel etki, sosyo-ekonomik etki, arazi kullanım yapısı vb. parametreleri de dikkate almaktadır (Özalp ve Öcalır, 2008). Oluşturulan modeller ile sosyal, demografik ve ekonomik değişkenlerle ulaşım talebi arasındaki ilişki açıklanabilmekte ve buna bağlı olarak da yolculuk talebi tahmin edilebilmektedir. Modelleme esnasında kullanılan veri girdileri; sosyal ve demografik özellikler, coğrafi özellikler, ulaşım sistemi verileri, yolculuk verileri gibi çeşitlendirilebilmektedir (DLH, 2015).

Ulaşım modellemesi kapsamında ülkemizde yaygın olarak uygulanan yaklaşım dört aşamalı modelleme yaklaşımıdır. Yolculuk temelli yaklaşımlar altında sınıflandırılan bu modelleme yaklaşımı; yolculuk yaratım/çekim modeli, yolculuk dağıtım modeli, türel (mode) ayırım modeli ve yolculuk atama modeli olmak üzere 4 temel modeli kapsamakta olup, bu yaklaşımla yolculuk talep tahminleri yapılarak talep düzeylerine göre hayata geçirilmesi planlanan alternatif projelerin etkileri belirlenebilmektedir.

Bu kapsamda ülkemizde büyükşehir belediyeleri bazında ulaşım planlaması konusunda yapılan çalışmalardan bazıları şu şekildedir:

- İstanbul Metropolitan Alanı Kentsel Ulaşım Ana Planı-2011: Hane halkı yolculuk anketleri ve mevcut trafik verilerinin analizi tamamlandıktan sonra “4 Aşamalı Yolculuk Talep Modeli” olarak bilinen ulaşım talep tahmini TransCAD programı kullanılarak geliştirilmiştir.
- Ankara Ulaşım Ana Planı-2015: Modelleme ile Ankara’nın ulaşım sistemi ve bu sistemi kullananlar arasındaki ilişkiler büyük oranda tespit edilmiş olup, gelecekte Ankara ulaşım kurgusunun genel çerçevesi elde edilmiştir.
- İzmir Ulaşım Ana Planı-2017: İzmir BB sınırları içerisindeki 30 ilçe ve 1293 mahalleyi kapsayan planda modelleme çalışmaları kapsamında 4 aşamalı talep tahmin modeli kullanılmıştır.
- Diyarbakır Ulaşım Ana Planı-2013: Kentsel gelişme stratejileri doğrultusunda yolculuk taleplerinin belirlenmesi, ulaşım yatırımları ve önceliklerinin belirlenmesi, gelecekte meydana gelmesi beklenen ulaşım ve trafik sistemi için temel planlama kararlarının oluşturulması amacıyla hazırlanmıştır.
- Muğla Ulaşım Ana Planı-2018: Kentin gelecekte olası ulaşım sorunlarına çözüm üretilmesinin amaçlandığı ulaşım planı iki aşamalı, iki düzeyli ve iki dönemli olacak şekilde hazırlanmıştır.

5.3 IVE

Uluslararası Araç Emisyonları (IVE) Modeli, motorlu taşıtlardan kaynaklanan emisyonları tahmin etmek için tasarlanmış bir bilgisayar modelidir. Model, şehirler ve bölgeler için emisyon tahminleri geliştirmeye yardımcı olmayı amaçlamakta olup; odak kontrol stratejileri ve ulaşım planlaması, farklı stratejilerin yerel emisyonları nasıl etkileyeceğinin tahmin edilmesi ve zaman içinde emisyonların azaltılmasındaki ilerlemenin ölçülmesi için kullanılmaktadır. Model, hava kirleticileri (kriterli kirleticileri), sera gazı emisyonları ve zehirli kirleticileri tahmin etmektedir (ISSRC, 2018).

Kazakistan’ın Almatı bölgesinde yapılan bir çalışmada iki hafta süresince 94 adet benzinli araçta 30 dakikalık ölçümler boyunca saniye saniye CO, CO₂ ve NO emisyonları ölçülmüştür. Araç rotası arterlerde düşük hızda, otoyolda yüksek hızda olmak üzere çeşitli sürüş koşullarını içerecek şekilde seçilmiştir. Elde edilen emisyonlarla bağlantılı olarak saniye saniye motor gücü talepleri analiz edilmiş olup,

elde edilen emisyonlar IVE Modelinin daha önce toplanan aktivite bilgileri ile birlikte Almatı için bir arazi emisyon envanteri oluşturmak amacıyla kullanılmıştır (Lents ve diğ., 2007).

Çin'in Pekin kentinde yapılan başka bir çalışmada ise 24 tanesi hafif hizmet aracı olarak sınıflandırılan toplamda 33 adet dizel araç test edilmiştir. Araçlara ekipman kurulumu gerçekleştirildikten sonra 30-40 dakikalık sürüşler gerçekleştirilmiştir. CO, CO₂, toplam hidrokarbonlar (THC), NO_x, ve NO₂ ve partikül emisyonları ölçülmüştür. Farklı sürüş koşullarında emisyonların nasıl değiştiğini belirlemek için IVE modeli kullanılmış olup, model sonuçları ölçüm sonuçlarından daha fazla tahmin edilmiştir (Tolvett ve diğ., 2007).

Aynı çalışma benzer şekilde İstanbul, Mexico City ve Sao Paulo için de gerçekleştirilmiştir. İstanbul için yürütülen çalışmada 29 tanesi hafif hizmet aracı olarak sınıflandırılan toplamda 42 adet dizel araç test edilmiştir. Araçlara ekipman kurulumu gerçekleştirildikten sonra 36-50 dakikalık sürüşler gerçekleştirilmiş olup, devreyi tamamlamak için kullanılan tipik zaman 38 dakika olmuştur. CO₂ emisyonları açısından ölçüm sonuçları ile ölçüm sonuçları arasında yakın değerler elde edilmiş, %3-6 fark bulunmuştur. PM sonuçları incelendiğinde ise ölçülen değerlerin IVE modeli tarafından tahmin edilen değerden daha düşük olduğu görülmüştür. IVE modelinde varsayılan temel emisyon faktörleri, ABD'de yapılan emisyon ölçümlerine dayanmakta ve binlerce aracın test sonuçlarını temsil etmektedir (Lents ve diğ., 2007).

Mexico City ve Sao Paulo için yapılan çalışmada da CO₂ için ölçüm sonuçları ile model sonuçları birbirine yakın çıkmış, en büyük farklılık NO_x emisyonlarında yaşanmıştır. Ölçüm sonuçları model sonuçlarından 2,3-3 kat fazladır (Lents ve diğ., 2007).

2010 yılında ülkemizde yürütülen bir tez çalışması kapsamında 2015 ve 2030 seneleri için İstanbul'da Marmaray Projesinin işletimde olduğu ve olmadığı durumlar için ayrı ayrı IVE Modeli ile emisyon hesaplaması yapılmıştır ve bulunan sonuçların emisyon açısından değişimi, kriter kirleticiler, sera gazı kirleticileri ve toksik kirleticiler için ayrı ayrı yorumlanmıştır. Mevcut durum ile 2015 yılı ve 2030 yılının Projeli - Projesiz durumlarındaki sonuçları kıyaslandığında; Projesiz durumunda, yıldan yıla otomobil artışıyla çıkan emisyonun (kriter kirleticiler, sera gazları ve toksik gazlar için); Projeli duruma oranla çok fazla miktarda arttığı gözlemlenmiştir (Saatçioğlu, 2010).

İran'da yapılan bir çalışma kapsamında, Tahran'daki taksilere özellikle vurgu yapılarak, ulaşım sistemindeki yakıt kalitesinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. IVE modelini kullanarak araç emisyonunun değerlendirilmesi için aşağıdan yukarıya bir yaklaşım sunulmuş olup, çalışma sonucunda CO emisyonunun temiz yakıt tüketimi (Euro IV) nedeniyle% 87,6 oranında azaldığı tespit edilmiş, güncellenmiş yakıt kalitesini arttırmanın Tahran'daki hava kalitesini iyileştirmek için önemli bir adım olduğu sonucuna varılmıştır (Ghadiri ve diğ., 2017).

Yine Tebriz'in ana ve en işlek caddelerinden biri olan İmam Humeyni Caddesi'ndeki taksi filosunun emisyon miktarları ve emisyon faktörlerini tahmin etmek ve farklı senaryoların etkilerini incelemek amacıyla yürütülmüş olan bir çalışmada da IVE emisyon modeli kullanılmıştır (Kalajahi ve diğ., 2020).

5.4 COPERT

COPERT'in gelişimi, Avrupa Çevre Ajansı (AÇA) tarafından, Avrupa Hava Kirliliği ve İklim Değişikliği Azaltma Merkezi'nin faaliyetleri çerçevesinde koordine edilmektedir. Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi, modelin bilimsel gelişimini yönetmektedir. COPERT, AÇA üye ülkelerinde resmi karayolu taşımacılığı emisyon envanter hazırlığı için geliştirilmiştir. Bununla birlikte, ilgili tüm araştırma, bilimsel ve akademik uygulamalara uygulanabilmektedir.

COPERT, AB standart araç emisyonları hesaplayıcısı olup, araç sayısı, kilometre, hız ve ortam sıcaklığı gibi diğer verileri kullanarak belirli bir ülke veya bölge için emisyonları ve enerji tüketimini hesaplamaktadır. Birçok Avrupa ülkesinin resmi emisyon verilerini raporlamada kullandığı bir araç olan COPERT ulusal, bölgesel veya yerel ölçekte emisyonlar (sera gazları, hava kirleticileri ve toksik türler) ile yıllık ve günlük tahminleri hesaplamaktadır.

COPERT, yolcu arabaları, hafif ticari araçlar, ağır vasıtalar (kamyonlar ve otobüsler dahil), L kategorili araçlar (mopedler, motosikletler, dörtlüler ve mini arabalar dahil) dahil olmak üzere 450'den fazla araç tipi için emisyon faktörleri içerir (Emisia, 2018). COPERT, ulaştırma sektörüne yönelik yapılan çalışmalarda çok defa kullanılmış olup, ulusal ve uluslararası çalışmalardan bazı örnekler aşağıda sıralanmıştır.

İstanbul Boğaz Köprüleri'nde taşıtların yarattığı kirliliğin hesaplanmasına yönelik 2007 yılında tamamlanmış olan bir tez çalışmasında COPERT III modeli ile EPA

tarafından geliştirilen MOBILE 6 modeli kullanılmıştır. Çalışmada 1. Köprü'nün 2006 yılında sadece otomobil grubu araçların geçisine tahsis edilmesi, 2. Köprü'nün ağır vasıta araçlarının yükünün tamamını alması ve nakit ödeme giselerinin kaldırılarak, geçişlerin sadece Otomatik Geçiş Sistemi (OGS) ve Kartlı Geçiş Sistemi (KGS)'ne tahsis edilmesi sonucu yaşanan değişimin emisyonlar üzerinde yaratacağı etki COPERT III modeli kullanarak tahmin edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre 1. Köprüde CO ve HC emisyonlarında önemli oranda artışa karşılık NO_x emisyonlarında azalma görülmüştür. 2. Köprüde ise NO_x emisyonundaki artışa karşılık CO ve HC değerlerinde azalma söz konusu olmuştur (Deniz, 2007).

Ülkemizde tamamlanmış bir çalışmada eski adı ile Boğaziçi Köprüsü (15 Temmuz Şehitler Köprüsü) üzerinde belirli zaman ve periyotlarda yapılan kamera çekimlerinden elde edilen veriler ışığında kullanılan metodolojiler her bir taşıt sınıfı için ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve Copert 4 simülasyon programı kullanılarak 7:00-19:00 saatleri arasında köprüden geçen her bir taşıt sınıfı için ortama atılan zararlı emisyonlar saatlik olarak hesaplanmıştır. Bunu takiben köprü üzerinden geçen taşıtların saatlik mevcut ortalama hızları her bir taşıt sınıfı için ayrı ayrı incelenerek ortalama hızın toplam salınan emisyonlar üzerine etkileri belirlenmiş ayrıca binek otomobillerin ortama saldıkları emisyon miktarlarının sahip oldukları motor hacimlerine göre nasıl eğilim gösterdiği incelenmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Çalışma sonucunda binek otomobiller, hafif ticari taşıtlar ve otobüsler için en düşük ortalama hız olan 30,5 km/saat'de taşıt başına salınan emisyon miktarının en yüksek değere ulaştığı gözlemlenmiştir. Binek otomobiller, hafif ticari taşıtlar ve otobüsler için hızın en düşük (30,5 km/saat) olduğu 8:00-9:00 aralığında sırasıyla birim taşıt başına emisyon miktarları 0,3569, 0,4510, 1,5449 kg/taşıt değerine ulaşarak pik yapmıştır. İlerleyen saatlerde tüm bu taşıt sınıfları için birim taşıt başına atılan emisyon miktarı yaklaşık 80 km/saat'lik hıza kadar lineer bir azalış göstermekte; fakat, bu hızdan sonra hızın artmasıyla emisyon miktarları da artmaktadır (Yıldırım, 2010).

Yürütülmüş diğer bir çalışmada Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yıllık olarak gerçekleştirilen yol kenarı dingil ağırlığı etütleri ile yıllık yük akış istatistikleri bir arada kullanılarak karma bir model geliştirilmiş olup, söz konusu model kullanılarak 2000-2009 yılları arasındaki emisyonlar COPERT 4 programı ile tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- CO₂ emisyonları bu sürede neredeyse sabit kalmıştır,

- Standart kamyonların emisyon paylarında %25 azalma görülürken, büyük kamyonların emisyon payları üç katına çıkmıştır,
- Emisyonlar, kamyonların sadece uzun mesafede boş gitmelerinin engellenmesi durumunda, %11 oranına kadar azaltılabilmektedir,
- Sadece az dolu giden kamyonların ortadan kaldırıldığı senaryoda kayda değer bir emisyon azaltımı sağlanmamıştır,
- Geleneksel kamyonları Euro IV kamyonları ile değiştirmeyi öngören senaryoda ise, özellikle kontrol altında tutulan emisyonlarda, ciddi bir azaltım potansiyeli bulunmuştur (Özen, 2013).

Çeşitli ulaşım politikaları, otonom veya elektrikli araçlar sunarak ve P&R tesisleri (sürücülerin araçlarını park edip şehir merkezine otobüslerle gidip ve döndüğü bir sistem) aracılığıyla özelden toplu taşımaya geçişi teşvik ederek özel araçların neden olduğu kirlilik seviyelerini azaltmakta olup, bu politikaları incelemeyi ve hangi kombinasyonların kirliliği daha iyi azaltabileceğini belirlemeyi amaçlayan bir çalışmada COPERT yazılımı emisyonları hesaplamak için kullanılmıştır. Sonuç, her otonom araç kombinasyonunun kirliliği farklı derecelere düşürdüğünü göstermiştir. Otonom elektrikli araçlar ve P&R sistemleri aracılığıyla daha sürdürülebilir ulaşım modlarına geçiş, kentsel çevredeki kirliliği daha yüksek yüzdeye düşürmektedir. Aksine, otonom araçların kombinasyonu daha düşük emisyon azaltımına sahiptir, ancak mevcut altyapıyla uygulanması daha kolaydır (Obaid ve diğ., 2021).

5.5 MOVES

Motor Araç Emisyo Simülatörü (MOVES) ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından tasarlanan, mobil kaynaklar için kriterli hava kirleticilere, sera gazlarına ve hava toksiklerine ilişkin emisyonları tahmin eden bir modelleme sistemidir. Model, otomobil, kamyon, otobüs ve motosiklet gibi karayolu araçlarından kaynaklanan birçok hava kirletici ve sera gazı emisyonu için farklı ölçeklerdeki emisyon faktörlerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, bu model hava kalitesi yönetimi için çeşitli senaryoların değerlendirilmesinde kullanılabilmektedir (EPA, 2018).

2013 yılında tamamlanan bir tez çalışması kapsamında MOVES modeli kullanılarak İzmir Karşıyaka Tüneli'nde karbon monoksit, azot oksitler, partiküler maddeler, fenantren, antrasen vb. on altı poli aromatik hidrokarbon bileşiğine ait emisyon

faktörleri hesaplanmıştır. Çalışmada yaz ve kış aylarında tekrarlanmak üzere tünelin girişinden ve çıkışından örnekleme yapılmıştır. Sonradan örnekleme sonuçları ile modelleme sonuçları arasındaki fark karşılaştırılmış olup, ortalama %6 fark bulunmuştur (Kara, 2013).

Düşük karbonlu ulaşım için şehir içi trafik karbon emisyonlarının kapsamlı analizlerinin yapılması kritik öneme sahip olmaktadır. Bu amaçla, Jiangsu eyaletinin Şangay ve Wuxi'deki tipik yollarında trafik akışı, meteorolojik koşullar, araç karbon emisyonları ve sürüş özellikleri hakkında ilgili verileri toplanarak MOVES emisyon modeli kalibre edilmiş ve sırasıyla mikroskobik, mezoskopik ve makroskopik seviyelerde trafik karbon emisyonlarını analiz etmek için çeşitli duyarlılık ve korelasyon değerlendirme indeksleri ile kullanılmıştır. Sonuç olarak, kentsel trafik karbon emisyonları kantitatif olarak değerlendirilmiş ve Şangay'daki binek araçlardan toplam CO, CO₂ ve HC emisyonu miktarları sırasıyla 76,95 kt, 8271,91 kt ve 2,13 kt olarak tahmin edilmiştir (Sun ve diğ., 2017).

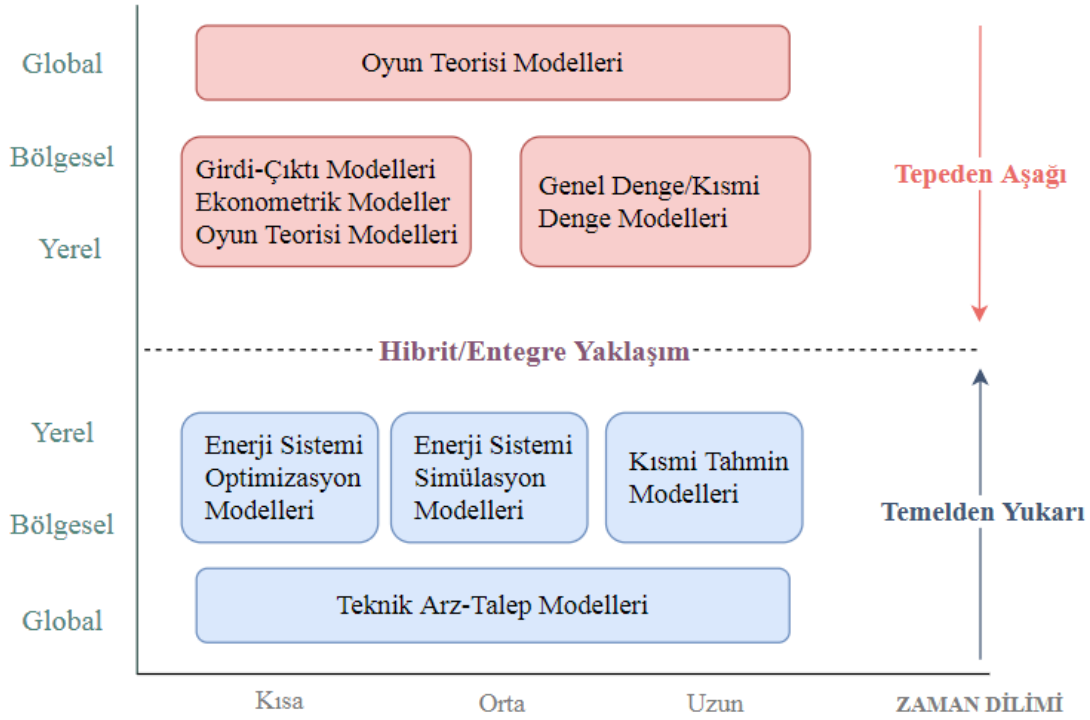
5.6 Enerji-Ekonomi-Çevre Modelleri

Enerji sistemindeki karmaşık taleplerin değerlendirilmesi, temel ekonomik parametreler ile enerji kullanımı arasındaki bağlantıların analiz edilmesi için oluşturulan enerji ve ekonomik modellerin görevi olup, mevcut iklim değişikliğini azaltma bağlamında bu modeller uzun vadeli enerji gereksinimi tahminleri ve gelecekteki emisyonların belirlenmesinde için kullanılmaktadır.

Enerji-ekonomi-çevre modellerinin ana amacı, iklim değişikliği alanında ekonomik maliyetleri hesaplamak ve bu maliyetleri göz önünde bulundurarak uygun politika seçimi için öngörüler sunmaktır. İklim değişikliğini çevre, enerji ve ekonomi perspektifinde analiz eden bu modeller tüm enerji sektörlerini ele almakta ancak, sektör bazında da kullanılabilmektedir.

Enerji-ekonomi ve çevre arasındaki karmaşık ilişkilerin değerlendirildiği modelleme yaklaşımları “tepeden aşağı (top-down)” ve “temelden yukarı (bottom-up)” modeller olmak üzere iki kategoride sınıflandırılmaktadır (Kanitkar, 2019; Karakaya, 2008). Bu iki yaklaşımın zaman dilimi ve coğrafi gruplandırma bazında sınıflandırılması Şekil 5.1’de verilmiştir (Karakaya, 2008; Kemfert , 2003).

COĞRAFİ GRUPLANDIRMA



Şekil 5.1 : Enerji-ekonomi-çevre modellerinin sınıflandırılması (Karakaya, 2008; Kemfert , 2003).

5.6.1 Tepeden aşağı (top-down) modeller

Tepeden aşağı modellerde, sistemin değerlendirilmesi için toplam ekonomik değişkenler kullanılmaktadır. Bu kapsamda, GSYİH, nüfus, enerji fiyatları, teknolojik gelişme oranı gibi temel parametrelerin tanımlandığı denklemler oluşturularak bir denge çerçevesinde ekonomik maliyetler, girdi ve çıktılar arasındaki ilişkiler tahmin edilmektedir.

Tepeden aşağı modeller enerji sistemine yönelik teknolojik detayları içermemeleri sebebiyle ileri teknolojik yenilikleri temsil etme kabiliyetine sahip değildir ve olası teknolojik değişiklikler sonucu oluşabilecek etkiler değerlendirilememektedir.

Tepeden aşağı model yaklaşımı altında sınıflandırılan modelleme tekniklerinden bazıları şu şekildedir (Kanitkar, 2019; Işık, 2016; Karakaya, 2008):

- *Oyun teorisi temelli modeller*

İklim değişikliğine yönelik azaltım hedefleri ve politika seçeneklerinin işbirliği halinde ya da uzlaşma olmadan uygulanması durumunda ortaya çıkacak sonuçlar değerlendirilmektedir.

- *Ekonometrik modeller*

Denge varsayımlarını dikkate almayan ekonometrik modeller detaylı bir ekonomik yapı içermekte olup, sektörlerdeki yatırım ve tüketim kalıplarını kullanarak sera gazı azaltım politikalarının kısa vadeli analizlerini gerçekleştirmektedir. POLES (Prospective Outlook on Long-term Energy Systems), E3ME (Energy-Environment-Economy Model for Europe) ve QUEST (A Macro-Econometric Model for EUC Countries) bu grup altında yer alan modellerden bazılarıdır.

- *Girdi-çıktı modelleri*

Sektörlere göre tanımlanan ekonomik yapının doğrusal denklemlerle temsil edildiği girdi-çıktı modellerinde, ekonomik sektörler arasındaki karşılıklı ilişkiler tanımlanmakta ve talep yönlü politikaların herhangi bir sektör ya da tüm ekonomi üzerine olan etkileri değerlendirilmektedir. MIS (Macroeconomic Information System), ENDAM (Energy EcoNomy Environmental Damage Model) ve MEPA (Massachusetts Economic Policy Analysis) bu grup altında yer alan modellerden bazılarıdır.

- *Hesaplanabilir genel denge modelleri*

Enerji arz ve talep fonksiyonlarını tanımlamak için optimizasyon yöntemlerini kullanan hesaplanabilir genel denge modelleri, enerji-ekonomi analizi için kullanılan en yaygın model çeşididir. Bu modellerde piyasa dengesi varsayımları altında bir girdi-çıktı çerçevesine dayalı olarak hesaplanan üretim fonksiyonları, gelecekteki enerji gereksinimlerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Hesaplanabilir denge modelleri sera gazı azaltım politikalarının değerlendirilmesinde önemli bir yere sahiptir ancak, tepeden aşağı modelleme yaklaşımının genel eksikliği olarak teknolojik detayların tanımlanmaması dezavantaj oluşturmaktadır.

GREEN (GeneRal Equilibrium ENvironmental), ICES (The Intertemporal Computable Equilibrium System), HERMES (Harmonized European Research for Macro-sectorial and Energy Systems model), AIM (The Asian Pacific Integrated Model) ve SGM (The Second Generation Model) bu grup altında yer alan modellerden bazılarıdır.

- *Entegre değerlendirme modelleri*

İklim değişikliğinin kontrolü için politika seçeneklerini değerlendirmek amacıyla sosyo-ekonomik modeller ve biyo-fiziki mühendislik modellerinin bir araya getirildiği Entegre Değerlendirme Modelleri (EDM)'nin geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır.

EDM, sosyo-ekonomik boyutu oluşturan çalışmalar ile demografik gelişme, tüketim kalıpları ve ekonomik kalkınma gibi parametrelerin ileriye yönelik senaryo tahminlerinde bulunmakta ve bu senaryolar kullanılarak sera gazı emisyon projeksiyonları yapılmaktadır. Sonrasında elde edilen çıktılar sektörel etkilerin değerlendirilmesi için farklı modellere girdi oluşturmakta, ayrıca fayda-maliyet analizi çalışmalarında kullanılabilmektedir.

ANEMI (An Integrated System Dynamics Model for Analyzing Behavior of the Social-Energy-Economic-Climatic System), MINICAM (Mini-Climate Assessment Model), DICE (The Dynamic Integrated model of Climate and the Economy) ve WITCH (The World Induced Technical Change Hybrid) bu grup altında yer alan modellerden bazılarıdır.

5.6.2 Temelden yukarı (bottom-up) modeller

Ekonomik büyümenin tarihsel yörüngelerini ve bunların enerji talepleri üzerindeki sonuçlarını tahmin eden temelden yukarı (bottom-up) yaklaşımlı modeller, teknoloji temelli enerji modellerini içermekte ve mühendislik ağırlıklı ilişkileri esas almaktadır.

Tepeden aşağı yaklaşımlı modellerin aksine tüm teknolojik detayları hesaba katan temelden yukarı yaklaşımlı modeller, teknoloji uygunluğu, enerji kaynaklarının potansiyeli, salımlar vb. ile kısıtlanan enerji talebini karşılamak için en düşük maliyetli enerji teknolojileri kombinasyonunu bulmaya çalışmaktadır. Gelecek dönemlerde teknoloji yapısı değişkenlik gösterebilmektedir. Genelde kısmi denge analizine göre yapılandırılan bu modellerde emisyonlar, elde edilen çıktılardır.

Temelden yukarı model yaklaşımı altında sınıflandırılan ve yaygın olarak kabul edilen modelleme metodolojileri şu şekildedir (Kanitkar, 2019; Işık, 2016; Karakaya, 2008):

- *Simülasyon modelleri*

Enerji arz ve talebini detaylı bir şekilde modelleyen simülasyon modelleri çevrim, üretim ve nihai sektör aşamalarına ilişkin tüm teknolojileri içermektedir. Tüketicilerin ve üreticilerin davranışları çeşitli koşullar altında simüle edilmekte ve teknoloji seçimi

için son kullanıcı davranışı belirlenmektedir. Bu tip modellerde genellikle alternatif senaryoların referans senaryoya göre karşılaştırmalı analizleri yapılmaktadır.

NEMS (National Energy Modeling System), ENPEP (Energy and Power Evaluation Program) ve POLES (Prospective Outlook on Long-term Energy Systems) bu grup altında yer alan modellerden bazılarıdır.

- *Optimizasyon modelleri*

Optimizasyon modelleri, çeşitli teknik, finansal ve çevresel kısıtlamalar ile amaç fonksiyonuna dayalı olarak teknoloji konfigürasyonlarını dikkate almakta ve enerji sistemlerinin en düşük maliyetle işlemlerini sağlayacak optimum çözümleri bulmayı amaçlamaktadır. Temelden yukarı modelleme yaklaşımında en fazla kullanılan araçlar olup, uzun dönemli değerlendirme yapma imkanı sunmaktadırlar.

MARKAL (MARKet Allocation), TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System), EFOM-ENV (Energy Flow and Optimization Model - ENVironment) ve PRIMES (The Primes Energy System Model) bu sınıfa ait olan en popüler enerji çevre modellemelerinden bazılarıdır.

Yaygın olarak kullanılan bir doğrusal programlama modeli olan MARKAL, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından geliştirilmiştir. Güvenilir sonuç vermesi, ve modellenen sistemi detaylı olarak temsil edebilmesi sebebiyle ulusal ya da yerel ölçekte enerji planlaması ve sera gazı azaltım stratejilerinin geliştirilmesi amacıyla çok sayıda ülke tarafından tercih edilmektedir.

MARKAL modelinin gelişmiş bir versiyonu olan TIMES, MARKAL ile birlikte yapılan çalışmalarda tercih edilen en popüler iki temelden yukarı enerji modelleridir. MARKAL'da olduğu gibi model içerisinde farklı politika ve senaryoları analiz etmek mümkün olmaktadır. Bu çalışma kapsamında TIMES modeli kullanılmış olup, modele ilişkin detaylı açıklamalar ve yapılan çalışmalar Bölüm 0'da verilmiştir.

- *Muhasebe modelleri*

Muhasebe modelleri enerjinin fiziksel akışını tablolar kullanarak tanımlamaktadır. Ana işlevi verileri ve sonuçları yönetmek olan bu tür modellerde sosyal, ekonomik ve teknolojik varsayımların gelecekte beklenen neticeleri kullanıcı tarafından sunulmaktadır. Muhasebe modellerinin, benzetim modelleri gibi diğer bazı sınıflarla birleştirilerek kullanımı da tercih edilmektedir. Bu tür modellere örnekler LEAP (The

Long-range Energy Alternatives Planning system), BUENAS (Bottom–Up Energy Analysis System) ve PAMS (A Poverty Analysis Macroeconomic Simulator) şeklinde sıralanabilir.

Stockholm Çevre Enstitüsü'nde geliştirilen enerji politikası analizi ve iklim değişikliğini azaltım politikalarının değerlendirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir yazılım aracı olan LEAP, dünya çapında 190'dan fazla ülkede binlerce kuruluş tarafından kullanılmaktadır. LEAP, ekonominin tüm sektörlerinde enerji tüketimini, üretimini ve kaynak çıkarımını değerlendirmek için kullanılabilen senaryo tabanlı entegre bir modelleme aracıdır (LEAP, 2021).

5.6.3 Hibrit modeller

Hem temelden yukarı model yaklaşımlarında olduğu gibi teknolojik detayları içeren, hem de tepeden aşağı model yaklaşımlarında olduğu gibi makro-ekonomik yapıyı ve politikaların detaylı etkilerini hesaba katan hibrit modeller daha güçlü analiz yapabilmektedir.

6. TIMES MODELİ

TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) modeli; uzun dönemde yerel, ulusal veya çok bölgeli bir enerji sistemindeki dinamiklerin tahmini için teknoloji açısından zengin bir temel sunan, ekonomik bir modeldir. Genellikle tüm enerji sektörünün analizinde kullanılmakta olup, aynı zamanda tek bir sektörün incelenmesi için de uygulanabilmektedir. Nihai enerji talepleri kullanıcı tarafından tahmin edilmektedir. Buna ek olarak, mevcut ve gelecekteki teknolojilerin özellikleri ile mevcut ve gelecekteki birincil enerji arzı kaynakları ve potansiyellerine ilişkin tahminlerin modele kullanıcı tarafından girilmesi gerekmektedir. Bunları girdi olarak kullanan TIMES modeli, eşzamanlı olarak ekipman yatırım ve işletme, birincil enerji arzı ve enerji ticareti kararları verme yoluyla çevresel kriterleri de dikkate alarak minimum küresel maliyette enerji hizmetleri tedarik etmeyi amaçlamakta olup; modelin kapsamı, tamamen enerji odaklı konuların ötesinde, çevresel emisyonların temsiline kadar uzanmaktadır.

TIMES modelinde tanımlanan emtialar, miktar ve fiyat açısından denge halindedir. Örneğin; belirli bir zaman periyodunda tedarikçiler tarafından üretilen miktar ve fiyat tüketicilerin talep ettiği miktarları tam olarak karşılayacak şekildedir. Bu denge, toplam arz fazlasını maksimize etme özelliğine sahiptir.

TIMES modeli senaryo yaklaşımını ele almakta olup, farklı senaryolar altında enerji sektörünün gelecekteki olası durumunun araştırılmasına olanak sağlamaktadır. TIMES Modeli'nde eksiksiz bir senaryo, enerji talepleri, birincil kaynak potansiyeli, politika (yasal düzenlemeler) ve teknoloji tanımlamalarını içeren dört tür girdi içermektedir.

- *Enerji talebi bileşeni*

Nüfus, GSYİH, hanehalkı vb. parametreler diğer modellerden veya kabul edilen başka kaynaklardan haricen temin edilmektedir. Örneğin; ülkemizin nüfus değerlerine ve ileriye yönelik nüfus projeksiyonlarına ilişkin veriler Türkiye İstatistik Kurumu'ndan temin edilebilmektedir. Modelin parametreleri belirlendikten ve sayısallaştırıldıktan sonra referans senaryonun oluşturulması için gelecekteki enerji taleplerinin

hesaplanması gerekmektedir. Bu, ilgili parametrelere ilişkin esneklikler göz önüne alınarak yapılmaktadır.

Enerji talepleri referans senaryo için hesaplanmaktadır; bununla birlikte, model alternatif senaryolar için (emisyon kısıtı olan bir vakada veya alternatif teknolojik varsayımlar için) çalıştırıldığında taleplerin etkilenmesi muhtemel olmaktadır. Bu durumda model, taleplerin alternatif bir senaryonun değişen koşullarına tepkisini tahmin etme kabiliyetine sahiptir; ancak, yine de varsayılan esnekliklere ilişkin başka bir girdi setine ihtiyaç duyulmakta, sonrasında model harici bir müdahale olmaksızın alternatif durumlardaki talepleri içsel olarak değiştirebilmektedir.

- *Arz bileşeni*

Senaryonun ikinci bileşeni, birincil enerji ve maddi kaynaklar için bir dizi arz eğrisinden oluşmaktadır. Çok aşamalı tedarik eğrileri, TIMES modelinde kolayca modellenen bilmekte; her bir aşama, mevcut kaynağın belirli bir potansiyelini temsil etmektedir.

- *Politika bileşeni*

Bazı politikalar enerji sistemi üzerinde etkili olduğu için, senaryo tanımının ayrılmaz bir parçası olabilmektedirler. Örneğin, politika bileşeni olmayan bir senaryo, çeşitli kirleticilerin emisyonlarını tamamen göz ardı edebilirken, alternatif politika senaryoları emisyon kısıtlamalarını veya emisyon vergilerini zorlayabilir.

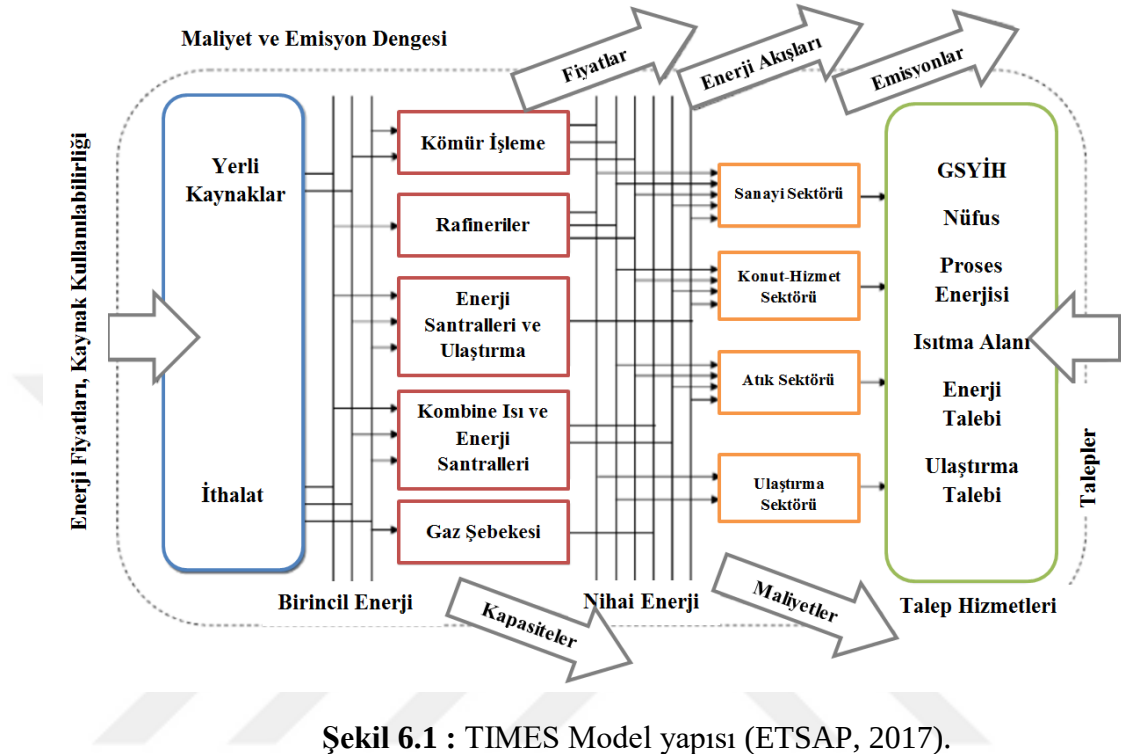
- *Tekno-ekonomik bileşen*

Bir senaryonun dördüncü ve son bileşeni, birincil kaynakların enerji hizmetlerine dönüştürülmesi için varsayılan teknik ve ekonomik parametrelerin kümesidir. Modelde, bu tekno-ekonomik parametreler, bazı emtiaları diğerlerine (yakıtlar, enerji hizmetleri, emisyonlar) dönüştüren teknolojiler (veya süreçler) şeklinde tanımlanmaktadır (Loulou ve diğ., 2016).

6.1 Modelin Temel Yapısı

TIMES modelleri, birincil kaynaklardan enerji hizmetlerinin tedarikine kadar tüm adımları kapsamaktadır. Enerji arzı tarafı, yakıt madenciliği (yakıt çıkarma), birincil ve ikincil üretim ile ithalat ve ihracatı kapsamaktadır. Çeşitli enerji taşıyıcıları aracılığıyla enerji, sektörel olarak konut, hizmet, tarım, ulaşım ve sanayi şeklinde

yapılandırılmış talep tarafına ulaştırılmaktadır. Enerji arz tarafının aracıları üreticiler, enerji talep tarafının aracıları ise tüketiciler olup, bu üreticiler ile tüketiciler arasındaki matematiksel, ekonomik ve mühendislik ilişkileri, TIMES modellerinin temelini oluşturmaktadır. TIMES model yapısı Şekil 6.1’de gösterilmiştir (ETSAP, 2017).



Şekil 6.1 : TIMES Model yapısı (ETSAP, 2017).

Tüm TIMES modelleri üç temel elemandan oluşturulmaktadır:

- *Teknolojiler*

Teknolojiler (prosesler olarak da adlandırılmaktadır), emtiaları başka emtialara dönüştüren fiziksel cihazların temsilleridir. Prosesler, birincil emtia kaynakları (örn. madencilik prosesleri, ithalat prosesleri) veya elektrik üreten dönüştürme tesisleri gibi dönüşüm faaliyetleri, rafineriler gibi enerji işleme tesisleri ile arabalar ve ısıtma sistemleri gibi nihai kullanım talep teknolojileri olabilmektedir.

- *Emtialar*

Emtialar (yakıtlar dahil) enerji taşıyıcıları, enerji hizmetleri, malzemeler, parasal akışlar ve emisyonlar olup, teknolojiler tarafından üretilmekte ya da tüketilmektedir.

- *Emtia akışları*

Emtia akışları, süreçler ve emtialar arasındaki bağlantılardır. Akış, bir emtia ile aynı niteliktedir, ancak belirli bir sürece bağlı olmakta ve bu sürecin bir girdisini veya bir çıktısını temsil etmektedir.

Bu üç unsur, söz konusu ülke veya bölgeyi karakterize eden bir enerji sistemi oluşturmak için kullanılmaktadır. Tüm TIMES modelleri, enerji sisteminin temel bir modeli olan bir referans enerji sistemine sahiptir (ETSAP, 2017).

6.1.1 Referans Enerji Sistemi (RES)

Referans enerji sistemi (RES), kaynaktan nihai talebe kadar olan enerji sistemini gösteren bir ağ diyagramını ifade etmektedir. TIMES Modeli RES esas alınarak düzenlenmekte olup, enerji sistemi kademelere ayrılmaktadır. Model, enerji kaynakları, enerji dönüşüm teknolojileri, enerji taşıyıcılar ve talep teknolojilerinden oluşmakta; bu teknolojiler aydınlatma, ısıtma, ulaştırma vb. nihai enerji taleplerini içeren son aşamayı beslemektedir. TIMES parametreleri üç genel kategoriden oluşmaktadır:

- *Teknik parametreler:* Verimlilik, kullanılabilirlik faktörü, birim faaliyet başına emtia tüketimi, birim faaliyet başına yakıt kullanımı, teknik ömür, vb.
- *Ekonomik ve politik parametreler:* Yatırıma bağlı bakım ve işletme maliyetleri, vergiler ve sübvansiyonlar (esnek bir şekilde tanımlanabilir). Diğer ekonomik parametreler ise bir prosesin ekonomik ömrü ve prosese özgü iskonto oranıdır.
- *Kısıtlar:* Modelleyici bir sürecin yatırımı, kapasitesi ve etkinliği üzerinde çeşitli sınırlar koyabilmektedir.

Referans senaryo için nihai enerji talepleri kullanıcı tarafından modelde tanımlanmaktadır. İlaveten kullanıcılar tüm sektörlerde kullanılan enerji tüketen ekipmanların mevcut kapasitelerini ve gelecekteki potansiyel teknolojilerin özelliklerini temin etmektedirler. Model, çevresel emisyonların ve enerji sistemi ile ilişkili maddelerin temsiline de imkan sağlamaktadır (Loulou ve diğ.,2016).

6.1.2 TIMES doğrusal programlama

TIMES, matematiksel olarak bir Doğrusal Programdır. Doğrusal Program (DP), aynı zamanda denklemler olarak da adlandırılan doğrusal kısıtlamalara tabi olan bir amaç

fonksiyonunun (karar değişkenlerinin doğrusal matematiksel ifadesi olarak tanımlanır) en aza indirilmesi veya maksimize edilmesidir. Bazen milyonlarca kısıtlama ve değişken içeren çok büyük Doğrusal Program örnekleri, GAMS gibi modern modelleme dilleri kullanılarak formüle edilebilmektedir. Doğrusal bir optimizasyon problemi formülasyonu; karar değişkenleri (optimizasyon ile belirlenecek bilinmeyenler), amaç fonksiyonu (minimize ya da maksimize edilecek kriter) ve kısıtları (optimal çözümle karşılanması gereken karar değişkenlerini içeren denklemler veya eşitsizlikler) içermektedir.

6.1.2.1 İndisler

TIMES modelinde yer alan indisler ve açıklamaları şu şekildedir;

- r: çalışılan bölge/alan
- t ya da v: zaman periyodu; mevcut zaman periyodu t ile, teknolojinin eskimesi durumunda v ile gösterilir. Yeni bir teknolojiye $t=v$ olur.
- p: proses (teknoloji)
- s: zaman aralığı; genellikle yıllık olarak belirlenir.
- c: emtia (enerji, malzeme, emisyon ya da talep).

6.1.2.2 Karar Değişkenleri

Karar değişkenleri, model tarafından yapılacak seçimleri, yani bilinmeyenleri temsil etmekte olup, TIMES modelindeki bazı ana karar değişkenleri şunlardır:

- VAR_NCAP (r,v,p): p prosesinin/teknolojisinin v periyodu ve r bölgesindeki yeni kapasite ilavesi. Tipik birimler çoğu enerji teknolojisi için [PJ/yıl], Milyar araç-kilometre [B-vkm/yıl], elektrik için GW vb.şeklindedir.
- VAR_CAP (r,t,p): p prosesinin/teknolojisinin t periyodu ve r bölgesindeki toplam kurulu kapasitesi [PJ/yıl]
- VAR_ACT (r,t,p): p prosesinin/teknolojisinin t periyodu ve r bölgesindeki aktivitesi (opsiyonel olarak v:eski zaman periyodu ve s:zaman aralığı) [PJ]
- VAR_FLO (r,t,p,c): c ürününün p prosesi/teknolojisi tarafından t periyodunda ve r bölgesinde tüketildiği veya üretildiği miktar [PJ]. VAR_FLO değişkenleri, kullanıcının girdi ve/veya çıktı akışlarının süreç etkinliğiyle sıkı bir şekilde

bağılantılı olmadığı esnek süreçleri tanımlamasına olanak tanıdığından, TIMES'te modellenen süreçlere önemli ölçüde esneklik sağlar.

- VAR_DEM (r,t,d): d nihai enerji hizmetinin t periyodu ve r bölgesindeki talebi. Referans senaryoda bu değişken kullanıcı tarafından sabitlenmiş olsa bile gerçek bir değişkendir. Ancak, alternatif senaryolarda, VAR_DEM (r,t,d), taleplerin kendi fiyatlarına yanıt verebilmesi nedeniyle referans durum talebinden farklı olabilir (talebin kendi fiyat esnekliği).

6.1.2.3 Amaç Fonksiyonu

TIMES modelinde amaç, sistem maliyetini en aza indirmek olup, amaç fonksiyonunda tüm maliyet unsurları kullanıcı tarafından seçilen yıla uygun şekilde indirgenmektedir. Her yıl için toplam maliyet unsurları başta ilk yatırım maliyeti ile işletme ve bakım maliyetleri olmak üzere, ithalat maliyeti, ekstraksiyon ve üretim maliyetleri, ihracattan elde edilen gelirler, dağıtım maliyeti, vergi ve sübvansiyonlar, hasar maliyetleri, hurda maliyeti ve refah kaybını içerebilmektedir.

Bu unsurlar maliyet profiline kesinlik ve gerçekçilik katarken, aynı zamanda amaç fonksiyonunu karmaşık matematiksel ifadeler haline getirmektedir. Basitleştirilmiş bir formülasyonda amaç fonksiyonunu oluşturan maliyet unsurlarına ilişki genel göstergeler; yatırım maliyetleri, planlama döneminin sonunda hala aktif olan tüm yatırımların hurda değeri ve yukarıda listelenen diğer maliyetler (yıllık yatırım maliyetine eklenir) şeklindedir.

TIMES modelinin eş zamanlı karar vermesinde kullandığı temel denklem (6.1) şu şekildedir:

$$NPV = \sum_{r=1}^R \sum_{y \in YEARS} (1 + d_{r,y})^{REFYR-y} \cdot ANNCOST(r,y) \quad (6.1)$$

Denklemden;

- NPV: Tüm bölgeleri için toplam maliyetin net bugünkü değeri (TIMES amaç fonksiyonu)
- ANNCOST(r,y): r bölgesinde ve y yılındaki toplam yıllık maliyet
- $d_{r,y}$: Genel iskonto oranı
- REFYR: İskonto referans yılı

- YEARS: Mliyetlerin olduğu yıllar grubu (çalışma planı kapsamında maliyet içeren tüm yıllar + geçmiş yatırımlar için maliyetin tanımlanması durumunda geçmiş yıllar + çalışma planı sonrasındaki hurda değeri gibi maliyetlerin tahakkuk edilebildiği birkaç yıl)
- r: çalışma alanı bölgeler
- R: çalışma alanındaki bölgeler kümesidir.

TIMES her bölge için yıllık maliyet akışının toplam net bugünkü değerini, kullanıcı tarafından seçilen bir referans yıla indirgenmiş olarak hesaplamakta, bu bölgesel indirgenmiş maliyetler daha sonra, model tarafından minimize edilmiş tek bir toplam maliyette toplanmaktadır.

6.1.2.4 Kısıtlar

Model, toplam indirgenmiş maliyeti en aza indirirken, ilgili enerji sistemini doğru bir şekilde tasvir etmek için yerine getirilmesi gereken fiziksel ve mantıksal ilişkileri ifade eden çok sayıda kısıtlamayı karşılamalıdır. Çok farklı türde model kısıtı olup, ana kısıtlardan bazıları şu şekildedir:

- Kapasite transferi - EQ_CPT

Belirli bir teknolojiye yatırım yapmak, teknolojinin fiziksel ömrü boyunca kurulu kapasitesini artırmaktadır. Bu ömür sonunda, bu teknolojinin toplam kapasitesi aynı miktarda azalır. Model, belirli bir zaman diliminde mevcut kapasiteyi hesaplarken, model o döneme kadar olan tüm yatırımlardan kaynaklanan kapasiteyi hesaba katar. Her bir p teknolojisi için r bölgesindeki ve t yılındaki toplam kullanılabilir kapasite, model tarafından geçmiş ve mevcut dönemlerde yapılan ve fiziksel ömrü henüz sona ermemiş olan yatırımların toplamına, artı modelleme ufkundan önceki mevcut kapasiteye eşittir.

- Süreç değişkenlerinin tanımı - EQ_ACTFLO

Model aktivite değişkenlerinin yanı sıra akış değişkenlerini de ele almakta olup, bu iki değişkenin ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Bu, genel bir aktivite değişkeni olan VAR_ACT'i uygun akış değişkenleri seti VAR_FLO ile eşitleyen bir kısıtlama getirilerek yapılmaktadır.

- Kapasite kullanımı - EQ_CAPACT

Her bir zaman diliminde model, o teknolojinin Kullanılabilirlik Faktörüne (AF) göre kurulu kapasitenin bir kısmını veya tamamını kullanabilir.

Model, belirli zaman dilimlerinde veya bir veya daha fazla tam dönem boyunca, genel maliyeti en aza indirmeye katkıda bulunacaksa, mevcut kapasiteden daha azını kullanmaya karar verebilmektedir. Ancak, isteğe bağlı olarak, modelleyici belirli teknolojileri kapasitelerini tam potansiyellerinde kullanmaya zorlayabilmektedir. Teknolojinin etkinliği, kullanıcı tarafından bir kullanılabilirlik faktörü tanımlanması durumunda kullanılabilir kapasitesini aşamaz.

- Emtia dengesi - EQ_COMBAL

Her bir zaman diliminde, bir bölgedeki üretim artı yapılan ithalat, bölgede tüketilen ve ihraç edilen miktar ile dengelenmelidir. Kısıtlama, malzemeler durumunda bir eşitlik (yani üretilen ve ithal edilen miktar, tüketilen ve ihraç edilene tam olarak eşittir), enerji taşıyıcıları, emisyonlar ve talepler durumunda ise bir eşitsizlik (böylece bir miktar fazla üretime izin verir) şeklinde olmaktadır. Bu emtialar için, her zaman diliminde denge kısıtlaması sağlanmalıdır.

- Emtia üzerindeki kısıtlar

Modelde her dönemdeki emtia değişkenlerini basitçe sınırlayarak miktarlara kısıtlamalar koymak oldukça kolay olmaktadır. Emtialara birden fazla dönem boyunca kümülatif sınırlar koymak da mümkün olup, bu özellikle emisyonların kümülatif olarak sınırlandırılması veya fosil yakıtların rezervlerinin modellenmesi için yararlı bir özelliktir.

Kullanıcı belirli sektörlerin emisyonlarını kısıtlayabilmekte, vergi veya ceza uygulayabilmektedir.

Bunlar dışında, modelde ele alınabilecek diğer kısıtlar; EQ_BNDPRD (Bir ürünün toplam üretimi üzerindeki kısıtlama), EQ_BNDNET (Bir ürünün net üretimi (üretim-tüketim) üzerindeki kısıtlama), EQ_PEAK (Bir ürünün üretimi için belirlenen periyotta ulaşılabilecek maksimum kapasite değeri), EQ_ACTBND (Bir prosesin/teknolojinin belirlenen periyotta gerçekleştirebileceği toplam aktivite miktarı) ve diğer kullanıcı kısıtları olabilmektedir.

Herhangi bir kısıtın karşılanamaması durumunda, model talebin gerçekleştirilemeyeceğine ilişkin hata (infeasibility) vermektedir (Loulou ve diğ., 2016).

6.2 TIMES Veri İhtiyacı

TIMES veritabanında, Referans Enerji Sisteminin her bir ögesini tanımlamak için çeşitli veri kategorileri kullanılmakta olup, gerekli olan bu kategoriler sistem genelinde global parametreler, enerji hizmet talepleri, enerji taşıyıcıları, teknoloji karakterizasyonu, kaynak, proses, dönüşüm ve talep teknolojileri, çevresel değişkenler, kaynak, teknoloji, yatırım başına emisyonlar şeklindedir.

Global Parametreler

Global parametreler ana model varsayımları olarak tüm modele uygulanmakta olup, sistemin iki önemli özelliği şu şekildedir:

- Maliyet indirimi

TIMES, enerji kaynakları ve yatırımlarının temini, sabit ve değişken işletme ve bakım faaliyetlerinin maliyetlerine ihtiyaç duymaktadır. Tüm masraflar aynı para birimi cinsinden girilmelidir. Ayrıca, modele girilen tüm maliyetler bir referans yıla indirgenir.

- Yılın fraksiyonlara bölünmesi

Model mevsimsel değişim, haftalık değişim (haftaiçi, haftasonu), günlük değişim (gündüz, gece) olmak üzere üç farklı zaman dilimi tanımlamasına olanak sağlamaktadır.

Enerji Hizmet Talepleri

Enerji hizmet talepleri, bir enerji sisteminde, ilgili alt sektörler dağıtılmak üzere gereksinim duyulan spesifik nihai enerji hizmetlerini tanımlamaktadır. Konut aydınlatması ve ısıtması, taşımacılık, endüstriyel proses ısısı vb. enerji hizmetlerine örnek olarak gösterilebilir. Bir enerji hizmetine olan talep, doğrudan belirli bir enerji taşıyıcısının tüketimi anlamına gelmemektedir. Enerji hizmet talepleri faydalı enerji biriminden ölçülmekte olup, sektörler göre farklı şekilde ifade edilebilmektedir. Örneğin; ABD modelinde ulaşım hizmeti için talepler seyahat edilen mil cinsinden, endüstriyel proses enerjisi talebi ise petajul ($PJ=10^{15}$ J) cinsinden ifade edilmektedir.

Talebe ilişkin ihtiyaç duyulan ana veriler; sektörlerin enerji talep projeksiyonları ve mevsimlere ve gece gündüz değişimine göre talep değişimi şeklindedir (EPA, 2006).

Enerji Taşıyıcıları

Enerji taşıyıcıları modelde tanımlanan Referans Enerji Sisteminde üretilen ve tüketilen enerji türleri olup, modeldeki çeşitli teknolojiler arasındaki bağlantıları sağlamaktadırlar. Farklı kömür içeriğine sahip kömür, ham petrol ve petrol ürünleri gibi fosil yakıtlar, elektrik, yenilenebilir enerji (Ör: biyokütle, güneş, jeotermal) vb. enerji taşıyıcılara örnek olarak gösterilebilmektedir. Model, üretilen her enerji taşıyıcısının toplam miktarının, tüketilen toplam miktara eşit veya bu miktardan daha fazla olmasını gerektirmektedir.

Enerji taşıyıcılara ilişkin ihtiyaç duyulan ana veriler; tüm enerji taşıyıcıları için iletim verimliliği, iletim ve dağıtım sistemleri için yatırım, işletme ve bakım maliyetleri, rezerv marjı veya yıllık en yüksek ortalama talebin üzerinde olan kurulu kapasite miktarı şeklindedir.

Kaynak Teknolojileri

Kaynak teknolojileri enerji sistemine giren ve çıkan ham yakıtların ilk giriş noktası olup, ithalat ve ihracatları, madencilik ve ekstraksiyon ile yenilenebilir enerjiyi de içermektedir. Bu teknolojiler genellikle her bir model periyodu boyunca belirli bir fiyata ne kadar çok kaynak elde edilebileceğini gösteren kademeli arz eğrileri kullanılarak karakterize edilmektedir.

Kaynak teknolojilerine ilişkin ana veriler; her bir arz eğrisinde her bir kademenin boyutunu belirten sınırlar, her bir aşama için kaynak temini maliyeti, toplu kaynak sınırları (Ör: toplam petrol rezervuarı) şeklindedir.

Proses ve Talep Teknolojileri

Proses teknolojileri, petrol rafinerileri ve hidrojen üretim teknolojileri gibi enerji taşıyıcılarının şeklini, özelliklerini veya yerini değiştiren teknolojilerdir. Proses teknolojilerinin alt kategorisi olan dönüşüm teknolojileri, elektrik ve düşük sıcaklık ısı üretimini modellemektedir.

Talep teknolojileri nihai enerji hizmet taleplerini doğrudan karşılamak için kullanılan elektrikli cihazlar, araçlar vb. teknolojilerdir. Bu teknolojiler teknoloji maliyetleri,

yakıt tüketimi, verimlilik ve emre amadelik parametreleri kullanılarak karakterize edilmektedir.

Proses ve talep teknolojilerine ilişkin ana veriler; teknoloji maliyetleri, yeni kapasite için yatırım maliyeti, kurulu kapasite için sabit işletme ve bakım maliyetleri, kurulu kapasite için değişken işletme ve bakım maliyetleri, yakıt dağıtım maliyetleri, her bir teknolojiye giren ve çıkan enerji taşıyıcıları, teknik verimlilik, teknolojinin yatırıma hazır hale geldiği model yılı, emre amadelik faktörleri (proses teknolojileri için) ve kapasite kullanım faktörleri (talep teknolojileri için), mevcut kurulu kapasite, yeni yatırımlar veya toplam kurulu güç için kapasite sınırları, teknolojiye özel iskonto oranları şeklindedir.

Çevresel Emisyonlar

Model, bir kaynak veya teknolojinin kapasitesine, faaliyetine, kurulu kapasiteye veya yeni yatırıma göre emisyon üretimini izleyebilme kapasitesine sahiptir.

Çevresel değişkenlere ilişkin ana veriler; birim aktivite, kurulu kapasite veya yeni bir yatırım başına emisyonlar, emisyon kısıtları (Bir yıldaki emisyonlar için veya tüm model tüm zaman ufku için biçimlenebilir) şeklindedir.

TIMES modeli toplam enerji sistemi harcamalarını enküçüklemeyi amaçlamakta, doğrusal programlama yaklaşımını kullandığı için bu amaca ulaşırken; arz-talep dengesi, kapasite, girdi çıktı ilişkilerini içeren kısıtları göz önünde bulundurmaktadır. TIMES modeli içerisinde bulunan kısıt yapıları haricinde, kullanıcı tarafından özel kısıtların model içerisinde oluşturulmasına da olanak tanımaktadır.

TIMES modeli enerji alanında oluşturulacak her türlü plan, politika ve strateji için, enerji üretim ve tüketim teknolojileri üzerine oldukça kapsamlı sonuçlar sağlamaktadır.

6.3 TIMES Modeli ile Yapılan Çalışmalar

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde TIMES modeli ile gerçekleştirilmiş ve kapsamlı sonuçlar elde edilmiş örneklerle rastlanmaktadır. Sürdürülebilir enerji, çevresel gelişme stratejisi gibi enerji politikalarına yönelik çalışmaları yanı sıra nükleer enerji kullanımının sera gazlarına etkisinin incelendiği çalışmalar da mevcuttur.

Model, Arnavutluk, Avusturalya, Belçika, Danimarka, EU, Fransa, Amerika, Brezilya, Kanada, İtalya, İspanya, Portekiz, Polonya vb. dünya çapında birçok ülkede halihazırda kullanılmaktadır. TIMES Modeli kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde genellikle tüm enerji sistemini içeren araştırmalar yapıldığı görülmüştür. Uluslararası gerçekleştirilmiş önemli çalışmalardan bazıları aşağıda açıklanmıştır.

2013 yılında Norveç'te yürütülen bir çalışmada ulusal enerji sistemi modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Enerji üretimi, elektrik iletimi ve ısı dağıtımı, konut sektörü, hizmet sektörü, tarım sektörü, endüstri sektörü ve ulaştırma sektörü ele alınmış olup, ulaştırma teknolojileri benzinli araç, dizel araç, biyodizel araç, E85 otomobil (%85 etanol ve % 15 benzin), elektrikli akü, hibrit (elektrik ve benzin) gibi kategorilere bölünmüştür. Ülke toplamda yedi bölgeye bölünerek 2050 yılına kadar olan araç tahminleri gerçekleştirilmiştir (IFE, 2013).

Elektrik üretim sektörünün 2050 yılına kadar tamamen karbonsuzlaştırılmasını sağlamak için Portekiz kıtasındaki uygun maliyetli fırsatları analiz etmek amacıyla yapılan çalışma sonuçları, Portekiz'in izole bir sistem olarak modellenmesinin, düşük yatırım yapılmasına ve ülkenin uzun vadede yenilenebilir enerji kaynaklarının yetersiz kullanımına yol açabileceğini ve yatırımın verimliliğini azaltabileceğini göstermiştir (Amorim ve diğ., 2014).

Sürdürülebilir enerji ve akıllı enerji sistemleri alanında araştırmalar yapan EnergyVille tarafından oluşturulan TIMES- Belçika Modeli'nde 2016-2030 yılları için çalışılmıştır. Model tüm enerji sistemini (elektrik ve ısı) ve sektörleri (sanayi, hizmet, konut, tarım ve ulaştırma) içermektedir. Çalışmada 2030 yılına kadar karayolu taşımacılığında elektrikli araçlar için talep 4 TWh (10^{12} Wh) olarak bulunmuştur. Senaryo sonuçlarına göre yakıt fiyatlarının yükseldiği senaryoda 2030 yılında mevcut duruma göre daha az karbondioksit salımı olacaktır (EnergyVille, 2017).

Bina sektöründe yenilenebilir enerji kullanımı analiz edildiği başka bir çalışmada TIMES modeli, Çin'in inşaat sektöründe gelecekteki enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını modellemek için kullanılmıştır. Modelleme sonuçları, 2050'de referans senaryoda bina enerji tüketiminin 41,6 EJ (10^{18} J) civarında artmasının beklendiğini göstermektedir. 2050'de enerji tasarrufu potansiyeli, hem bina yalıtımının hem de enerji kullanım teknolojilerinin iyileştirilmesi nedeniyle 4EJ'ye kadar çıkabilmektedir.

Binalarda kullanılan yenilenebilir enerji, binalardaki karbon azaltımına büyük katkı sağlamaktadır. Çin'in inşaat sektörünün, daha düşük ve karbon bazlı olmayan yakıtların tüketilmesiyle nispeten düşük karbonlu bir geleceğe ulaşabileceği belirlenmiştir (Shi ve diğ., 2016).

Öte yandan, ulaştırma sektörüne yönelik uluslararası çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bir tanesi 2013 yılında Güney Afrika'nın Gauteng ili için enerji sistemi modelinin uygulandığı bir tez çalışması olup, ulaştırma sektörü için alternatif yakıtlar, taşıt teknolojileri ve ulaştırma altyapısı hakkında kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. TIMES Modelinin kullanıldığı çalışma sonucunda alternatif yakıtların veya farklı araç teknolojilerinin kullanılması ile sera gazı emisyonlarının azaltılması ve/veya ulaştırma sektöründe enerji verimliliğinin artırılması yönünde birçok olanak bulunduğu saptanmıştır (Tomaschek, 2013).

Çin ve ABD'nin ulaştırma sektörünün ele alındığı bir çalışmada, TIMES modelinin uygulanmasıyla karbon vergisi senaryo analizleri, karşılaştırmalı bir bakış açısıyla gerçekleştirilmiştir. Model sonuçları, sıvı yakıtların taşımacılıkta enerji tüketimine hakim olmaya devam edeceğini, biyoyakıtların ve elektrifikasyonun ise hem Çin'de hem de ABD'de ulaştırma sektörünün dekarbonizasyonunu kolaylaştıracağını göstermektedir. Ayrıca ulaştırma sektörünün karbon politikasına diğer sektörlerle göre daha az ve daha geç tepki verdiği gözlemlenmiştir (Zhang ve diğ., 2016).

Bunlar dışında ulaştırma sektörü kapsamında; Danimarka, Norveç ve İsveç'in ulusal enerji sistemlerini tasvir eden TIMES-Nordic, TIMES (Entegre MARKAL-EFOM Sistemi) modeli ile İskandinav enerji sisteminin dekarbonizasyonunda mod değişiminin rolünün analiz edildiği (Salvucci ve diğ., 2019), yolcu ve yük taşımacılığına özel olarak odaklanılarak Hindistan için 2050'ye kadar uzanan dört alternatif gelecek senaryosunun ANSWER MARKAL modeli kullanılarak analiz edildiği (Dhar ve diğ., 2018) çalışmalar bulunmaktadır.

Uluslararası gerçekleştirilmiş olan çalışmaları yanı sıra ülkemizde de çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. 2016 yılında ülkemizde tamamlanmış olan “Türk enerji sisteminin entegre geniş ölçekli enerji-ekonomi-çevre modeli ve analizi” başlıklı tez çalışmasında Boğaziçi Üniversitesi Enerji Modellemesi Sistemi (BUEMS) modeli kurulmuş ve Türkiye ulusal enerji sektörü verilerine göre TIMES modelleme sistemi ile elde edilen senaryolar ile elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır. Çalışmada, 2052 yılında kadar

emisyon azaltımını sağlayacak alternatif politika opsiyonları (emisyon vergisi, emisyon üst sınırı, yakıt tedariği sağlayacak altyapı yatırımları) altında Türk enerji sisteminin nasıl davrandığını gösteren analitik sonuçlar sağlayacak, geniş ölçekte senaryo analizleri gerçekleştirilmiştir (Işık, 2016).

Yine ülkemizde yürütölmüş olan “Düşük Karbonlu Kalkınma için Çözömsel Tabanlı Strateji ve Eylem Geliştirilmesi Teknik Destek Projesi” kapsamında binalar, atık, ulaşırma ve tarım sektörlerinde emisyon azaltım potansiyelleri belirlenmiş ve sera gazı emisyon azaltım maliyetleri değeriendirilmiştir (Sarica ve diğ., 2019).

TIMES Modelinin daha az gelişmiş önceki bir versiyonu olan MARKAL Modeli de dahil olmak üzere ölkemizde gerçekleştirilen diğeri çalışmalar Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Ülkemizde gerçekleştirilen diğer çalışmalar.

Kapsam-Yöntem	Referans
2010 yılında tamamlanmış olan bir çalışmada MARKAL modeli kullanılarak ülkemiz için 2000 ve 2005 yılı baz alınarak kurulmuştur, 2000-2025 yılları aralığı için sektörel bazda enerji talepleri belirlenmiştir.	(Sulukan, 2010)
Çalışma ile sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik yeni seçeneklerin ve sürdürülebilir bir enerji sisteminin ortaya konulmasıdır. MARKAL Modeli sektörel bazda 2000-2025 yılları için çalıştırılmıştır.	(Sağlam, 2010)
MARKAL Modeli kullanılarak Türkiye'deki endüstriyel enerji kullanımı ve sera gazı salımı 2006-2051 yılları için analiz edilmiştir. Bu kapsamda yoğun enerji tüketen dokuz alt sektör; kimyasal madde, çimento, cam, demir-çelik, demir-dışı metaller, kağıt, otomotiv, gıda ve içecek ile tekstil sektörleri ele alınmıştır.	(Alemdar, 2010)
MARKALTÜRKİYE modelinin özellikle elektrik üretim sektörü ile ilgili modülleri üstüne odaklanılmış, bu sektörün toplam maliyetlerini minimize etmek ve toplam sera gazı emisyonlarının miktarını belirlemek amacıyla ilgili MARKAL-TÜRKİYE modülleri güncellenmiş ve genişletilmiştir.	(Yılmazer, 2013)
Çalışmada, Answer-TIMES modelleme programı kullanılarak oluşturulan senaryolar bazında 2015 yılından 2035 yılına kadar elektrik üretim optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.	(Dal, 2017)
TIMES modelleme metodolojisi kullanılarak Türkiye enerji sisteminin ve özellikle elektrik sektörünün çeşitli enerji politikaları altında nasıl davrandığını gösteren senaryo analizlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.	(Tetik, 2017)



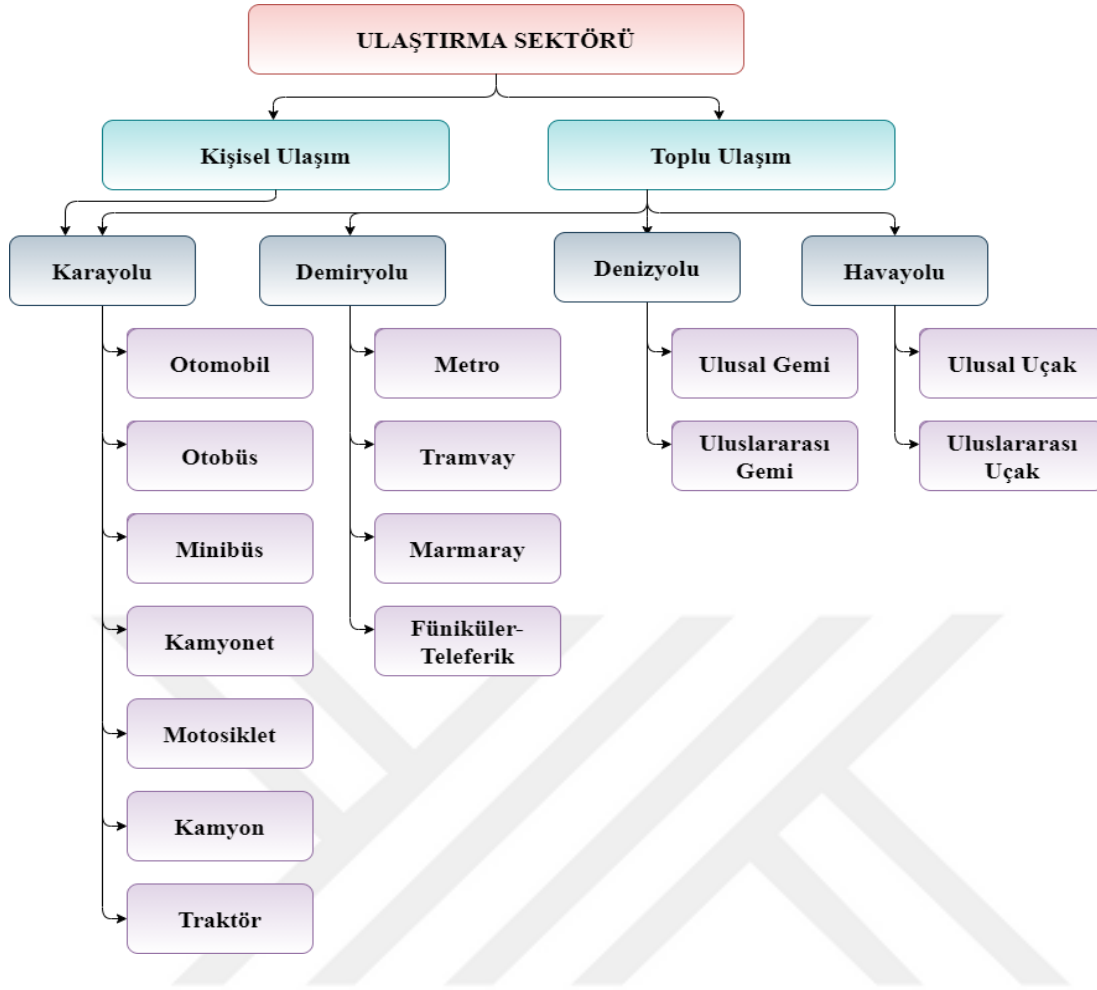
7. İSTANBUL ULAŞTIRMA SEKTÖRÜ OPTİMİZASYONU

7.1 Genel Bakış

TIMES-ITSECO (Istanbul Transportation Sector Optimization-İstanbul Ulaştırma Sektörü Optimizasyonu) modeli, Türkiye'nin yanı sıra dünya metropollerinde yer alan İstanbul için ulaştırma sektörünü modellemeyi amaçlamaktadır.

TIMES-ITSECO modelindeki ulaştırma sektörü karayolu, demiryolu, denizyolu ve havayolu olmak üzere dört alt kategoride değerlendirilmekte olup, her bir kategoride toplu ulaşım araçları ayrı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, karayolu ulaşımında temel araç kategorileri, otobüs, otomobil, minibüs, motorsiklet, metrobüs, kamyon, kamyonet ve traktör olarak belirlenmiştir. Demiryolu için tramvay, metro, marmaray ve funiküler-teleferik, havayolu için ulusal ve uluslararası uçak ve denizyolu için gemi araç kategorileri ele alınmıştır. Modelin ulaştırma modları Şekil 7.1'de görülmektedir.

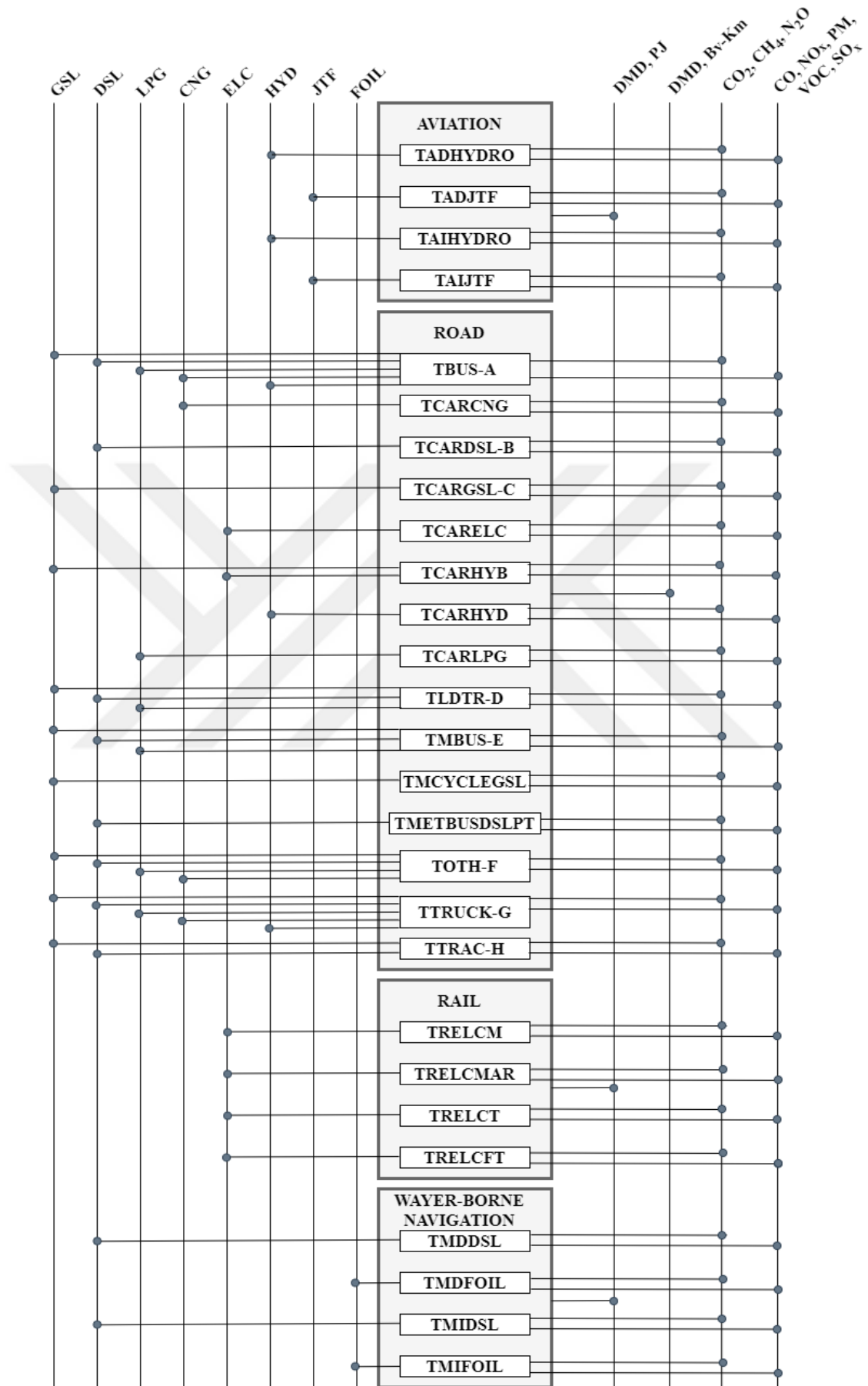
Modelde ele alınan tüm modlar için farklı teknolojiler ve yakıt seçenekleri bulunmaktadır. Örneğin; içten yanmalı motorla çalışan benzinli ya da dizel yakıtlı bir otomobil teknolojisinin yanı sıra elektrik veya hidrojenle çalışan otomobil teknolojileri de modelde yer almaktadır. Modelde tanımlanan ulaştırma taleplerini karşılamak için hizmet eden bu teknolojiler aynı zamanda çevresel emisyonlara sahiptir. Modelde tanımlanan teknolojiler ile girdi ve çıktıları özet bir şekilde ifade eden referans enerji sistemi Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.1 : Çalışmada ele alınan ulaştırma sektörü modları.

Şekil 7.2’de otobüs, dizel ve benzin yakıtlı otomobil, kamyonet, minibüs, kamyon, kamyonet ve diğer araçlar tek bir teknoloji şeklinde gösterilmiş olup, farklı yakıtların toplu olarak ifade edildiği A-H kısaltmaları teknolojilerin sonuna eklenmiştir. Örneğin; TBUS-A teknolojisindeki A harfi dizel, benzin, CNG, LPG ve hidrojen teknolojilerini kapsamaktadır. Modelde tanımlanan talep teknolojiler ve açıklamaları EK A’da detaylı olarak yer almaktadır.

Modelde temelde üç tip emtia tanımlanmıştır. Bunlar, emisyonlar, talepler ve teknoloji girdilerini oluşturan yakıtlardır. Emisyonlar karbondioksit (TRN-CO₂), metan (TRN-CH₄) ve nitroz oksit (TRN-N₂O) olmak üzere sera gazı emisyonları ile karbonmonoksit (TRN-CO), azot oksitler (TRN-NO_x), kükürt oksitler (TRN-SO_x), partikül madde (TRN-PM) ve uçucu organik karbonlar (TRN-VOC) olmak üzere diğer hava kirliliği emisyonlarından oluşmaktadır. Öte yandan, karayoluna ilişkin talepler milyar araç kilometre (Bv-km) olarak, demiryolu, denizyolu ve havayolu ulaşımı talepleri ise petajul (PJ) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.2 : TIMES-ITSECO referans enerji sistemi

Referans enerji sisteminde de görülebilen ve modelde tanımlanan teknolojilerin kullandığı yakıt türleri ise Şekil 7.3'te verilmiştir.

Teknolojiler \ Yakıtlar								
	Benzin	Dizel	LPG	CNG	Fuel-Oil	Hidrojen	Jet Yakıtı	Elektrik
Gemi		✓			✓			
Otobüs	✓	✓	✓	✓		✓		
Otomobil	✓	✓	✓	✓		✓		✓
Kamyonet	✓	✓	✓					
Minibüs	✓	✓	✓					
Motosiklet	✓							
Raylı Sistem*								✓
Metrobüs		✓		✓				
Kamyon	✓	✓	✓	✓		✓		
Traktör	✓	✓						
Uçak						✓	✓	

*Raylı sistem; metro, tramvay, Marmaray ve Füniküler-Teleferik teknolojilerini kapsamaktadır.

Şekil 7.3 : Teknolojilerin kullandığı yakıt türleri.

Modelde zaman dilimleri yıllık (annual), mevsimlik (Fall, Spring, Summer, Winter), ve günlük (Fall-Day, Fall Night, Spring-Day, Spring Night vb.) olarak tanımlanmıştır. Ancak mevcut durumda oluşturulan modelde yalnızca yıllık zaman dilimi kullanılmıştır. Modelde baz yıl en fazla verinin temin edilmiş olması sebebiyle 2016 yılı olarak belirlenmiştir. Model 2016, 2020, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045, 2050 ve 2055 yılları için çalıştırılacak şekilde oluşturulmuştur.

7.2 Model Girdilerinin Belirlenmesi

7.2.1 Nüfus projeksiyonu

İstanbul ili nüfus projeksiyonu yapılırken 2007-2019 yılları arası TÜİK Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi (ADKNS) verileri, İstanbul İklim Değişikliği Eylem Planı Final Raporu'nda yer alan 2020-2050 yılları arasındaki nüfus artış hızı veileri ve 2023 yılında tamamlanması öngörülen Kanal İstanbul Projesi Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) Raporu'ndan elde edilen nüfus artış verileri kullanılmıştır (TÜİK, 2021b; UAB, 2020c; İBB, 2018). Bu kapsamda, Kanal İstanbul Projesinin getireceği ek 1 milyon nüfus dikkate alınmış olup, 2050-2055 yılları arasında nüfus artış hızlarının önceki yıllara benzer şekilde azalma eğiliminde olacağı varsayımı yapılmıştır.

Öte yandan, araç sayısı projeksiyonunda kullanılmak üzere 15-64 yaş arası çalışabilir nüfus projeksiyonu hesaplanmıştır. Türkiye nüfusunun 2016 yılında %68'i, 2055 yılında ise %61'i 15-64 yaş aralığındadır. Bu orandaki azalma dikkate alınarak benzer şekilde İstanbul için 2016 yılında %71,4 olan 15-64 yaş nüfusu 2055 yılında %64,8 olarak hesaplanmıştır. Bu oranlar ve İstanbul nüfus projeksiyonu değerleri kullanılarak 15-64 yaş arası nüfuslar belirlenmiştir. İstanbul için hesaplanan nüfus değerleri Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1 : İstanbul nüfus projeksiyonu.

Yıl	Nüfus	15-64 Yaş Nufusu
2016	14.804.116	10.562.075
2020	15.984.342	11.419.900
2023	17.464.872	12.407.057
2025	18.414.557	12.962.501
2030	20.298.663	14.035.035
2035	21.323.621	14.591.135
2040	22.313.126	15.219.414
2045	23.263.855	15.507.652
2050	24.174.995	15.844.568
2055	25.040.929	16.214.263

7.2.2 GSYİH Projeksiyonu

İstanbul ili kişi başı GSYİH projeksiyonu için TÜİK verileri ve Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) verileri kullanılmıştır (TÜİK, 2021d; OECD, 2020). 2018 yılına kadar TÜİK'den elde edilen İstanbul'un ve Türkiye'nin kişi başı GSYİH verileri Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2 : Kişi başı GSYİH verileri (TL ve cari fiyatlarla) (TÜİK, 2021d).

Yıl	Türkiye	İstanbul
2008	14.001	23.852
2009	13.870	23.454
2010	15.860	26.253
2011	18.788	31.165
2012	20.880	34.637
2013	23.766	39.468
2014	26.489	43.645
2015	29.899	49.773
2016	32.904	54.933
2017	38.732	65.195
2018	45.750	76.769

Diğer yandan, Türkiye'nin 2060 yılına kadar GSYİH projeksiyonu OECD'den elde edilmiş olup, nüfus değerleri kullanılarak kişi başı GSYİH değerleri hesaplanmış ve

yıllık GSYİH artış oranları belirlenmiştir. OECD verilerine göre kişi başı GSYİH yıllık ortalama artış oranları 2020-2035 yılları arasında %2,8, 2036-2050 yılları arasında %2,4 ve 2051-2055 yılları arasında %2,2 şeklindedir.

Çizelge 7.2’de yer alan mevcut verilerden İstanbul ve Türkiye için kişi başı GSYİH artış oranlarına bakılmış ve yaklaşık aynı oldukları görülmüştür (Ortalama 0.2 fark mevcuttur). Bu sebeple, OECD'nin Türkiye projeksiyonundaki artış oranlarının İstanbul ili için de benzer olacağı varsayımı yapılmış olup, bu oranlar ve İstanbul’un GSYİH verileri kullanılarak 2055 yılına kadar projeksiyon yapılmıştır.

İstanbul için kişi başı GSYİH projeksiyonu Çizelge 7.3’te verilmiştir.

Çizelge 7.3 : İstanbul kişi başı GSYİH projeksiyonu.

Yıl	Kişi Başı GSYİH (1000 TL)
2016	55
2020	87
2023	98
2025	104
2030	117
2035	131
2040	147
2045	166
2050	187
2055	209

Model girdilerinin belirlenmesi için yapılan hesaplamalarda kullanılan veriler EK B’de verilmiştir.

7.2.3 Talep tahminleri

7.2.3.1 Karayolu

Karayolu ulaşımı talep tahminleri belirlenirken yapılan hesaplamalar çok sayıda alt bileşen içermektedir. Karayoluna ilişkin hesaplamalarda Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) istatistikleri, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Trafik ve Ulaşım Bilgileri, İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Ulaşım Raporları, İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri (İETT) Raporları vb. birçok veri kaynağı kullanılmıştır.

Araç sayısı projeksiyonu

İleriye yönelik araç sayısının belirlenmesinde 1000 kişiye düşen araç sayısı önemli bir parametredir. Bölüm 0’te açıklandığı gibi ülkelerin gelişmişlik düzeyleri arttıkça bu değer artmakta ve belirli bir doygunluğa ulaşmaktadır. 1000 kişi başına düşen araç doygunluk değerinin farklı ülkeler için 500-800 arasında değiştiği bilinmektedir.

Gelişmekte olan ülkemiz ve İstanbul için araç doygunluk değerine tahmini hangi yılda ulaşılacağı ve bu değer ne olacağı olacağı net değildir. Bu sebeple, hesaplama yapılırken böyle bir üst sınır koyulmamıştır. 1000 kişi başına düşen araç sayısı projeksiyonu için çalışabilir yaş aralığı olan 15-64 yaş arası nüfus ve kişi başı GSYİH değerleri kullanılarak denklem 5.1’e göre bir regresyon analizi yapılmıştır. Denklem 7.1’de Y bağımlı değişken (1000 kişi başına düşen araç sayısı), X_1 ve X_2 ağımsız değişkenler (15-64 yaş arası nüfus ve kişi başı GSYİH), b_1 ve b_2 regresyon katsayıları, a ise kesişim değeridir. Regresyon analizi excelin veri analizi aracı ile yapılmış olup, bu amaçla 2009-2016 yılları arasındaki veriler kullanılmıştır.

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 \quad (7.1)$$

Regresyon analizi sonucunda R^2 değeri 0,999, $a=439,86$, $b_1=-3.3 \times 10^{-5}$ ve $b_2=3.11$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, anlamlılık değeri $2,1 \times 10^{-8}$, katsayıların olasılık değerleri ise $3,8 \times 10^{-6}$, $4,1 \times 10^{-5}$ ve $1,3 \times 10^{-6}$ olarak belirlenmiş olup, tüm bu değerler %5’ten oldukça düşük olduklarından model anlamlıdır.

Regresyon analizi sonucu elde edilen katsayılar kullanılarak denklem 7.1’e göre 1000 kişi başına düşen araç sayısı 2055 yılına kadar belirlenmiştir. Sonrasında bu değerler ve nüfus projeksiyonu kullanılarak toplam araç sayısı projeksiyonu hesaplanmıştır (Çizelge 7.4)

Çizelge 7.4 : Toplam araç sayısı projeksiyonu.

Yıl	Araç Sayısı/1000 Kişi	Toplam Araç Sayısı
2016	260	3.845.349
2020	330	5.269.741
2023	333	5.812.033
2025	333	6.124.649
2030	339	6.875.350
2035	363	7.733.844
2040	390	8.708.736
2045	439	10.224.334
2050	494	11.953.673
2055	550	13.765.038

Karayolu kategorisinde araç türleri resmi istatistiklerle uyumlu olacak şekilde; otomobil, minibüs, otobüs, kamyonet, kamyon, motosiklet, özel amaçlı taşıtlar ve traktör olmak üzere sekiz sınıfa ayrılmıştır. Bu sınırlandırmaya göre İstanbul araç sayıları yıllara sari olarak 2018 yılına kadar TÜİK'ten elde edilmiş ve her bir araç türünün toplam içerisindeki oranları belirlenmiştir (TÜİK, 2021c). Baz yıl olan 2016 yılı ve sonrasındaki iki yıla ait oranların ortalaması alınmış ve sonraki yıllarda da araç türlerinin bu dağılıma sahip olacağı varsayımı yapılmıştır. Bu kapsamda, otomobil %69,1 ile en yüksek orana sahip olup, bu değeri %16,2 ile kamyonet ve %7,2 ile motosiklet takip etmektedir. Diğer araçların dağılım oranları ise kamyon için %3,3, minibüs için %2,2, otobüs için %1,1, traktör için %0,6 ve özel amaçlı taşıtlar için %0,2'dir. Bu oranlar kullanılarak projeksiyonu yapılan toplam araç sayısı araç türlerine göre hesaplanmış ve Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7.5 : Türlerine göre motorlu kara taşıt sayısı projeksiyonu.

Yıl	Toplam Araç Sayısı	Otomobil	Minibüs	Otobüs	Kamyonet	Kamyon	Motosiklet	Özel Amaçlı	Traktör
2005	2.261.356	1.590.283	60.674	43.241	349.990	114.077	75.873	8.734	18.484
2006	2.430.560	1.657.320	62.282	46.307	400.420	122.941	109.827	8.906	22.557
2007	2.570.559	1.711.773	63.816	49.640	447.530	130.790	129.819	9.136	28.055
2008	2.685.756	1.758.745	65.119	52.454	488.684	133.692	151.524	6.884	28.654
2009	2.721.203	1.775.335	61.764	52.216	507.067	128.528	164.021	6.167	26.105
2010	2.794.236	1.821.694	58.982	53.444	530.105	125.197	175.089	6.408	23.317
2011	2.927.650	1.907.782	57.022	57.716	559.219	126.535	190.905	6.116	22.355
2012	3.065.465	2.009.777	56.034	62.475	575.846	126.745	206.631	6.079	21.878
2013	3.230.908	2.146.257	68.692	52.667	585.783	126.046	223.307	6.441	21.715
2014	3.383.812	2.274.368	73.482	46.203	593.533	127.395	240.297	6.795	21.739
2015	3.624.403	2.463.995	83.017	46.413	612.444	131.746	258.773	5.960	22.055
2016	3.845.349	2.644.411	85.979	45.208	632.869	133.654	274.059	6.487	22.682
2017	4.061.725	2.813.027	90.121	44.351	657.572	134.318	291.791	7.334	23.211
2018	4.173.312	2.887.581	94.873	42.614	669.994	136.083	309.991	7.908	24.268
2020	5.269.741	3.639.944	118.183	57.768	855.486	176.421	381.861	9.464	30.614
2023	5.812.033	4.014.519	130.345	63.713	943.521	194.576	421.157	10.437	33.764
2025	6.124.649	4.230.451	137.356	67.140	994.271	205.042	443.810	10.999	35.580
2030	6.875.350	4.748.979	154.192	75.370	1.116.139	230.174	498.208	12.347	39.942
2035	7.733.844	5.341.962	173.445	84.781	1.255.506	258.915	560.417	13.889	44.929
2040	8.708.736	6.015.345	195.309	95.468	1.413.769	291.552	631.061	15.639	50.592
2045	10.224.334	7.062.207	229.299	112.082	1.659.810	342.292	740.885	18.361	59.397
2050	11.953.673	8.256.706	268.082	131.040	1.940.550	400.187	866.198	21.467	69.444
2055	13.765.038	9.507.861	308.706	150.896	2.234.605	460.828	997.455	24.720	79.966

Yakıt türlerine göre araç sayısı projeksiyonunun belirlenmesinde TÜİK'in iletmiş olduğu İstanbul için araç türüne, yakıtına ve araçların model yıllarına ilişkin detaylı bilgilerden yararlanılmıştır. Örneğin; İstanbul'da 2016 yılında trafikte olan 2000 model benzinli otomobil sayısı veya 1985 model dizel kamyon sayısı bilinmekte olup, diğer araç türleri ve yakıt türleri için de bu veriler bilinmektedir. Bu veriler kullanılarak araç türlerinin detaylı dağılımı elde edilmiş, 2016 yılı ve sonrasındaki yıllara ait oranların ortalaması alınarak bu dağılımın sonraki yıllarda da geçerli olacağı varsayımı yapılmıştır.

Öte yandan, emisyon standartları araçların egzoz emisyonları için getirilen sınırları tanımlamakta olup, ülkemizde de uygulanmaktadır. İstanbul'daki toplam araç sayısının yaklaşık %70'ini otomobiller oluşturmaktadır. Bu sebeple, tez çalışmasında sadece otomobiller için Euro emisyon standartlarını içerecek şekilde ayrıntılı bir sınıflandırma yapılmıştır.

Ülkemizde 2001 yılından itibaren otomobillerde Euro 1, Euro 2 ve Euro 3 standartlarına geçiş için Avrupa'nın gerisinde kalınmasından dolayı 2008 yılında direkt Euro 4, 2009 yılında Euro 5 ve 2014 yılının Eylül ayında Euro 5 standardına geçiş yapılmıştır (Url-5). Bu bağlamda, çalışmada dizel ve benzinli otomobiller; Euro 1, Euro 4, Euro 5 ve Euro 6 ile emisyon kontrol teknolojisi bulunmayan (NECS) araçlar olmak üzere beş farklı kategoride değerlendirilmiş olup, emisyon standardına göre araç sayısı hesaplamalarında kabul edilen model yılları Çizelge 7.6'da verilmiştir.

Çizelge 7.6 : Euro emisyon standartları için kabul edilen model yılları.

Emisyon Standardı	Başlangıç Model Yılı	Bitiş Model Yılı
NECS	1979	2000
Euro 1	2001	2007
Euro 4	2008	2008
Euro 5	2009	2014
Euro 6	2015	-

*Euro 6'ya geçiş 2014 yılının Eylül ayında olduğu için başlangıç 2015 olarak kabul edilmiştir.

İstanbul için derlenen veriler incelendiğinde otomobillerin ortalama 32 yıl boyunca trafikte kaldığı görülmüştür. Tüm bu bilgiler ışığında yakıtlarına göre araçlar dağılımları ve türlerine göre araç sayısı projeksiyonu kullanılarak yakıt türlerine göre araç sayısı belirlenebilmiştir.

Talep tahminlerinin hesaplanması

Karayoluna ait talep tahminleri diğer alt kategorilerde olduğu gibi PJ biriminde değil, milyar araç km (Bv-km) cinsinden hesaplanmıştır. Bu amaçla KGM'nin 2016 yılına ait *Otoyollar ve Devlet Yollarının Trafik Dilimlerine Göre Yıllık Ortalama Günlük Trafik Değerleri ve Ulaşım Bilgileri Raporu*'nda yer alan verilerden yararlanılmıştır (KGM, 2017). Rapor, Karayolları 1. Bölge Müdürlüğü; Edirne, Kırklareli, Tekirdağ, İstanbul, Kocaeli, Sakarya, Çanakkale ve Yalova illerine ait devlet yolları ve yıllık ortalama günlük trafik değerlerini içermektedir. Raporda ayrıca, İstanbul otoyollarına ilişkin veriler de yer almaktadır. Bu veriler kullanılarak İstanbul'un değerleri çekilmiş ve ortalama araç-km değerleri otomobil, orta yüklü ticari taşıt, otobüs, kamyon ve kamyon+römork, çekici+ yarı römork kategorilerine göre hesaplanmıştır.

Öte yanan TÜİK tarafından Türkiye için araçların yıllık araç-km değerleri yayınlanmaktadır (TÜİK, 2017). İstanbul'un otomobillerin için araç-km değeri KGM verilerinden hesaplanmış ancak yakıt türüne göre ayrımı yapılırken TÜİK verilerinden elde edilen oran kullanılmıştır. Ayrıca, motosiklete ait TÜİK verisinin İstanbul için de aynı olacağı varsayımı yapılmıştır. KGM'de toplu olarak verilen bazı kategoriler araç sayısı oranlarına göre ayrılmıştır. Bu kapsamda, talep tahmini hesaplamaları için kullanılan ortalama milyon araç-km/yıl değerleri şu şekilde belirlenmiştir:

- Kamyon: 7.122
- Kamyonet: 10.555
- Minibüs: 15.613
- Otobüs: 24.525
- Motosiklet: 3.766
- Otomobil: 7.613 (Benzinli), 14.036 (Dizel), 9.097 (LPG), 10.378 (CNG)
- Özel amaçlı: 1.608
- Traktör 5.621

Ortalama araç-km/yıl değerleri ve araç sayısı projeksiyonları kullanılarak karayolu için hesaplanan talep tahmini değerleri araç türüne göre Çizelge 7.7'de verilmiştir.

Çizelge 7.7 : Karayolu talep tahminleri, Bv-km.

Yıl	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Kamyon	0.9519	1.2565	1.3858	1.4604	1.6394	1.8441	2.0765	2.4379	2.8502
Kamyonet	6.6798	9.0294	9.9586	10.4943	11.7806	13.2515	14.9220	17.5189	20.4820
Minibüs	1.3423	1.8451	2.0350	2.1445	2.4073	2.7079	3.0493	3.5799	4.1854
Motosiklet	1.0321	1.4381	1.5860	1.6713	1.8762	2.1105	2.3765	2.7901	3.2620
Otobüs	1.0950	1.3992	1.5432	1.6262	1.8256	2.0535	2.3124	2.7148	3.1740
Otomobil	29.6723	41.0453	45.2691	47.7040	53.5511	60.2378	67.8311	79.6359	93.1055
Diğer	0.0104	0.0152	0.0168	0.0177	0.0199	0.0223	0.0251	0.0295	0.0345
Traktör	0.1275	0.1721	0.1898	0.2000	0.2245	0.2526	0.2844	0.3339	0.3904
Metrobüs	0.0137	0.0176	0.0194	0.0204	0.0229	0.0258	0.0290	0.0341	0.0398

7.2.3.2 Denizyolu

Denizyolu taşımacılığı ulusal ve uluslararası taşımacılık olmak üzere iki alt kategori altında değerlendirilmiş olup, ülkemizin yıllık sera gazı emisyonu envanteri belirlenirken yalnızca ulusal denizyolu taşımacılığı dahil edilmektedir. Denizyolu taşımacılığına ilişkin tüm istatistikler T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı tarafından yük, konteyner, Türk boğazları gemi geçiş, kabotaj hattı, kruvaziyer, ro-ro araç ve filo istatistikleri başlıkları altında, liman başkanlıkları bazında, yabancı ve Türk bayraklı olma durumlarına göre detaylı olarak sunulmaktadır (DGM, 2021).

Bu kapsamda, boğazlardan geçen gemi sayıları yıllara sari olarak Çizelge 7.8’de verilmiştir. Her iki boğazdan geçen gemi geçişlerinin yıllar itibariyle azaldığı görülmektedir.

Çizelge 7.8 : İstanbul ve Çanakkale Boğazları’ndan gemi geçiş verileri (DGM, 2021).

Yıl	İstanbul Boğazı		Çanakkale Boğazı	
	Gemi Adedi	Oran (%)	Gemi Adedi	Oran (%)
2008	54.396	52,6	48.978	47,4
2009	51.422	51,0	49.453	49,0
2010	50.871	52,1	46.686	47,9
2011	49.798	52,3	45.379	47,7
2012	48.329	52,0	44.613	48,0
2013	46.532	51,5	43.889	48,5
2014	45.529	51,1	43.582	48,9
2015	43.544	50,2	43.230	49,8
2016	42.553	49,1	44.035	50,9
2017	42.978	49,1	44.615	50,9
2018	41.103	48,3	43.999	51,7

Öte yandan, limanlarımıza uğrayan gemi sayıları Çizelge 7.9’da verilmiştir. İstanbul’da yer alan Ambarlı, İstanbul, Silivri, Tuzla ve Şile limanlarına gelen Türk bayraklı ve yabancı bayraklı gemi sayıları belirlenmiş ve ülkemiz limanlarına gelen toplam gemi sayısı ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7.9 : Türkiye limanlarına uğrayan gemi sayısı (DGM, 2021).

Yıl	İstanbul			Türkiye		
	Türk Bayraklı	Yabancı Bayraklı	Toplam	Türk Bayraklı	Yabancı Bayraklı	Toplam
2011	7.182	5.072	12.254	37.234	37.900	75.134
2012	7.255	5.021	12.276	38.333	37.542	75.875
2013	8.171	5.041	13.212	39.835	36.295	76.130
2014	7.535	4.843	12.378	38.685	36.081	74.766
2015	7.263	4.821	12.084	38.397	35.288	73.685
2016	6.884	4.170	11.054	37.644	33.576	71.220
2017	6.489	3.936	10.425	38.263	35.043	73.306
2018	6.020	3.784	9.804	38.219	34.141	72.360

Çizelge 7.9’da yer alan verilerden hem ulusal ve uluslararası deniz ulaşımının/taşımacılığının oranı, hem de tüm ülke içerisinde İstanbul’un oranı belirlenmiştir (Çizelge 7.10).

Çizelge 7.10 : İstanbul’un gemi geçiş oranları.

Yıl	İstanbul Gemi Geçiş Oranları (%)		İstanbul/Türkiye Gemi Geçiş Oranları (%)	
	Ulusal	Uluslararası	Ulusal	Uluslararası
2011	58,61	41,39	19,29	13,38
2012	59,10	40,90	18,93	13,37
2013	61,85	38,15	20,51	13,89
2014	60,87	39,13	19,48	13,42
2015	60,10	39,90	18,92	13,66
2016	62,28	37,72	18,29	12,42
2017	62,24	37,76	16,96	11,23
2018	61,40	38,60	15,75	11,08
Ortalama	61,97	38,03	17,00	11,58

İleriye yönelik ulusal ve uluslararası gemi geçiş projeksiyonlarında kullanılmak üzere belirlenen ortalama oranlar Çizelge 7.10’da görülmektedir. Bu oranlar, baz yıl olan 2016 yılı ve sonrasındaki değerler kullanılarak belirlenmiş olup, sonraki yıllarda da bu oranların geçerli olacağı varsayımı yapılmıştır.

Uluslararası denizyolu ulaşımı/taşımacılığı hesaplamaları boğazdan geçen yabancı bayraklı gemi verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öte yandan, ulusal denizyolu ulaşımı/taşımacılığı hesaplamalarında boğazlardan geçen Türk bayraklı gemilere ek

olarak toplu taşıma verileri de dikkate alınmış olup, toplu taşımaya ilişkin değerlendirme yolcu sayıları üzerinden gerçekleştirilmiştir.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Açık Veri Portalı'ndan elde edilen verilerden İDO, Şehir Hatları A.Ş. ve diğer özel tekne/motorlara ait günlük yolcu sayıları verileri kullanılarak yıllık yolcu sayıları hesaplanmıştır (Çizelge 7.11). 2016 yılı ve sonrasındaki veriler kullanılarak üç kategorideki yolcu sayılarının birbiri içerisindeki ortalama oranları İDO, Şehir Hatları A.Ş. ve diğer özel tekne/motor için sırasıyla %30,6, %40,7 ve %28,7 olarak belirlenmiş olup, bu oranların sonraki yıllarda da geçerli olacağı varsayımı yapılmıştır.

Çizelge 7.11 : İstanbul denizyolu ulaşımı yolcu sayıları (İBB, 2021).

Yıl	İDO		Şehir Hatları		Diğer Tekne/Motor	
	Milyon Kişi	%	Milyon Kişi	%	Milyon Kişi	%
2004	11,1	13,2	52,9	62,9	20,1	23,9
2014	68,4	36,3	68,5	36,4	51,3	27,3
2015	76,5	33,5	99,2	43,4	52,7	23,1
2016	63,2	30,5	92,1	44,5	51,6	25,0
2017	59,0	32,2	67,4	36,8	56,7	31,0
2018	59,7	28,9	84,5	40,9	62,3	30,2

Ulusal ve Uluslararası denizyolu ulaşımı/taşımacılığı kapsamında, önümüzdeki yıllarda İstanbul boğazlarından geçecek olan gemi sayısının belirlenmesinde Çizelge 7.8 - Çizelge 7.11'da gösterilen veriler kullanılmış olup, Çizelge 7.12'de sonuçları verilen hesaplamalara ilişkin detaylar şu şekildedir:

- İstanbul denizyolu ulaşımını kullanan yolcu sayısı ile İstanbul nüfusu arasında yıllara göre benzer bir oran olduğu görülmüş, yolcu sayısı/nüfus şeklinde ifade edilen bu oran ortalama 13,7 olarak hesaplanmıştır. Bu oran ve nüfus projeksiyonu ile elde edilen değerler kullanılarak 2055 yılına kadar denizyolu ulaşımı yolcu sayısı belirlenmiştir.
- Boğazlardan geçen yabancı ve Türk bayraklı gemi sayıları boyutlarının büyümesiyle birlikte yıllar geçtikçe azalış göstermiştir. Ancak, denizyolu ulaşımına ait talep de gün geçtikçe artış göstermektedir. Bu sebeple, ulusal denizyolu ulaşımı/taşımacılığına ait gemi sayısı projeksiyonlarında boğazlardan toplu ulaşım dışında geçen gemi sayıları için herhangi bir artış katsayısı kullanılmamış olup, yolcu sayısı artış oranları kullanılarak geçiş yapan gemi sayısı ileriye yönelik olarak belirlenmiştir.

- Uluslararası geçişler de gün geçtikçe azalmaktadır. Bu sebeple, bir önceki yıla göre 2019 yılında meydana gelen %0,02 gibi ufak bir artış oranı kabul edilmiş ve yıllara sari gemi geçiş sayıları belirlenmiştir. Böylelikle, uluslararası geçişin azalmaya devam etmeyeceği ancak kayda değer bir artışın da olmayacağı varsayımı yapılmıştır.

Çizelge 7.12 : İstanbul gemi geçiş ve denizyolu ulaşımı yolcu sayısı projeksiyonları.

Yıl	Yolcu Sayısı (Milyon Kişi)	Ulusal Geçiş	Uluslararası Geçiş	Toplam
2016	207	26.500	16.053	42.553
2020	219	26.787	15.871	42.659
2025	252	30.860	15.889	46.749
2030	278	34.018	15.906	49.924
2035	292	35.735	15.923	51.659
2040	306	37.394	15.941	53.334
2045	319	38.987	15.958	54.945
2050	331	40.514	15.976	56.490
2055	343	41.965	15.993	57.958

Ülkemizin ulusal ve uluslararası denizyolu ulaşımı/taşımacılığı için tüketmiş olduğu yakıt verileri, CRF tablolarında verilmektedir (Çizelge 7.13) (Url-6).

Çizelge 7.13 : Türkiye denizyolu ulaşımı yakıt tüketimi, TJ.

Yıl	Ulusal			Uluslararası		
	Dizel	F. Oil	Toplam	Dizel	F. Oil	Toplam
2004	11.873	4.393	16.266	24.252	17.736	41.988
2005	12.783	4.441	17.225	23.134	21.452	44.586
2006	14.950	4.486	19.436	17.587	23.472	41.059
2007	16.715	4.526	21.241	3.301	27.022	30.323
2008	16.972	3.588	20.561	6.236	23.878	30.114
2009	21.879	113	21.991	3.956	32.781	36.737
2010	22.569	90	22.658	4.476	26.582	31.058
2011	27.690	2.368	30.058	3.347	21.813	25.160
2012	20.335	1.335	21.670	4.933	28.853	33.786
2013	14.519	967	15.486	5.403	31.913	37.316
2014	16.854	1.228	18.083	4.386	37.572	41.958
2015	13.909	1.460	15.369	4.816	30.542	35.358
2016	11.180	1.778	12.958	3.479	35.175	38.654
2017	11.395	1.441	12.836	3.115	34.371	37.487
2018	11.266	1.384	12.650	3.899	36.620	40.520

Yakıt verileri ve Türkiye için verilen gemi sayısı verileri kullanılarak birim yakıt tüketimleri hesaplanmış, özellikle son yıllar için hesaplanan yakıt tüketimlerinin birbirlerine oldukça benzer olduğu görülmüştür. Bu sebeple, 2016 yılı ve sonrasındaki

değerlerin ortalaması alınmış, ulusal ve uluslararası gemiler için birim yakıt tüketimleri sırasıyla 0,34 TJ/Gemi ve 1,14 TJ/Gemi olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin, sonraki yıllar için yapılan hesaplamalarda da aynı olacağı varsayımı yapılmıştır. Öte yandan, ulusal denizyolu ulaşımı/taşımacılığında toplam yakıt tüketiminin ortalama %12'sini fuel-oil, %88'ini ise dizel oluşturmaktadır. Bu oranlar uluslararası denizyolu ulaşımı/taşımacılığında ise fuel-oil için %91, dizel için ise %9'dur.

Sonuç olarak, birim yakıt tüketimleri ve gemi sayısı projeksiyonları kullanılarak toplam yakıt tüketimleri belirlenmiş olup, bu tüketimler yakıt tüketim oranlarına göre fuel-oil ve dizel olarak ayrılmıştır. Hesaplanan denizyolu ulaşımı talep tahminleri Çizelge 7.14'te verilmiştir.

Çizelge 7.14 : İstanbul denizyolu ulaşımı talep tahminleri, PJ.

Yıl	Ulusal			Uluslararası		
	Dizel Yakıtlı	F. Oil Yakıtlı	Toplam	Dizel Yakıtlı	F. Oil Yakıtlı	Toplam
2016	7,87	1,25	9,12	1,66	18,48	20,14
2020	7,94	1,08	9,02	1,62	18,03	19,65
2025	9,15	1,24	10,40	1,62	18,05	19,67
2030	10,09	1,37	11,46	1,62	18,07	19,69
2035	10,60	1,44	12,04	1,62	18,09	19,71
2040	11,09	1,51	12,60	1,63	18,11	19,73
2045	11,56	1,57	13,13	1,63	18,13	19,76
2050	12,02	1,63	13,65	1,63	18,15	19,78
2055	12,45	1,69	14,14	1,63	18,17	19,80

7.2.3.3 Havayolu

Havayolu ulaşımı ulusal ve uluslararası taşımacılık olmak üzere iki alt kategori altında değerlendirilmiş olup, ülkemizin yıllık sera gazı emisyonu envanteri belirlenirken yalnızca ulusal havayolu ulaşımı dahil edilmektedir. Havayolu ulaşımına ilişkin tüm iniş-kalkış istatistikleri Türkiye İstatistik Kurumu tarafından gelen uçuşlar ve giden uçuşlar olmak üzere, iller (havalimanları) bazında, iç hat ve dış hat uçuşları olma durumlarına göre detaylı olarak sunulmaktadır (TÜİK, 2021c).

Bu kapsamda, havalimanlarına iniş-kalkış yapan uçak sayıları yıllara sari olarak Çizelge 7.15'te verilmiştir.

Çizelge 7.15 : Havalimanlarına iniş-kalkış yapan uçak sayıları (1000 Adet) (TÜİK, 2021c).

Yıl	İstanbul			Türkiye		
	İç Hat	Dış Hat	Toplam	İç Hat	Dış Hat	Toplam
2010	179	216	394	520	400	919
2011	209	238	447	609	433	1.042
2012	217	273	490	630	463	1.093
2013	246	311	557	719	505	1.224
2014	273	353	626	792	554	1.346
2015	294	390	684	871	586	1.457
2016	301	398	698	918	535	1.453
2017	294	387	681	940	560	1.500
2018	293	405	698	923	621	1.544

Uçuş sayılarına bakıldığında yıllar itibariyle bir artış olduğu görülmektedir. Bu sebeple, hem ulusal hem de uluslararası uçuş sayılarına ilişkin projeksiyon hesaplamaları 2010-2018 yılları arasındaki eğilim dikkate alınarak belirlenmiştir (Çizelge 7.16).

Çizelge 7.16 : İstanbul uçuş sayısı projeksiyonu (Bin Adet).

Yıl	İç Hat	Dış Hat	Toplam
2016	301	398	698
2020	349	483	832
2025	426	611	1.037
2030	504	738	1.242
2035	581	866	1.447
2040	659	993	1.652
2045	736	1.121	1.857
2050	813	1.249	2.062
2055	891	1.376	2.267

Ülkemizin ulusal ve uluslararası havayolu ulaşımı için tüketmiş olduğu yakıt verileri, CRF tablolarında verilmektedir (Çizelge 7.17) (Url-6).

Çizelge 7.17 : Türkiye havayolu ulaşımı yakıt tüketimi, TJ.

Yıl	İç Hat	Dış Hat	Toplam
2010	40.043	81.937	121.980
2011	47.199	94.671	141.870
2012	52.686	107.473	160.159
2013	52.467	121.129	173.596
2014	57.243	138.775	196.018
2015	58.824	155.037	213.861
2016	59.884	148.668	208.551
2017	53.259	154.053	207.312

Yakıt verileri ve Türkiye için verilen uçuş sayısı verileri kullanılarak birim yakıt tüketimleri hesaplanmış, ulusal ve uluslararası uçaklar için birim yakıt tüketimleri sırasıyla 0,065 TJ/Uçak ve 0,278 TJ/Uçak olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin, sonraki yıllar için yapılan hesaplamalarda da aynı olacağı varsayımı yapılmıştır. Havayolu ulaşımında kullanılan tek yakıt jet yakıtıdır.

Sonuç olarak, birim yakıt tüketimleri ve uçuş sayısı projeksiyonları kullanılarak toplam yakıt tüketimleri belirlenmiştir. Hesaplanan havayolu ulaşımı talep Çizelge 7.18’te verilmiştir.

Çizelge 7.18 : İstanbul havayolu ulaşımı talep tahminleri, PJ.

Yıl	İç Hat	Dış Hat	Toplam
2016	20	110	130
2020	23	134	157
2025	28	170	197
2030	33	205	238
2035	38	240	278
2040	43	276	319
2045	48	311	359
2050	53	347	400
2055	58	382	440

7.2.3.4 Demiryolu

Demiryolu taşımacılığı metro, tramvay, fönüküler-teleferik ve Marmaray olmak üzere sınıflandırılmıştır. Metro, tramvay, fönüküler ve teleferik hatlarına ait yolcu sayıları verisi İBB AçıkVeri Portalı, Marmaray hattına ait yolcu sayıları ise Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD)’ndan elde edilmiş olup, yıllara sari olarak Çizelge 7.19’da verilmiştir (İBB, 2021; TCDD, 2018).

Çizelge 7.19 : İstanbul raylı sistem yıllık yolcu sayısı (1000 yolcu) (İBB, 2021; TCDD, 2018).

Yıl	Metro	Tramvay	Fönüküler-Teleferik	Marmaray
2007	137.433	93.732	9.078	-
2008	133.022	116.927	9.874	-
2009	124.883	124.307	9.368	-
2010	132.386	127.018	9.925	-
2011	147.047	136.226	11.104	-
2012	173.556	146.382	12.889	-
2013	232.156	155.720	13.799	-
2014	312.321	158.534	13.102	43.651
2015	384.871	162.042	11.875	60.958
2016	403.179	165.041	8.354	62.612
2017	422.559	173.113	5.779	63.063
2018	469.687	186.692	6.697	67.799

Çizelgede verilen yıllık yolcu sayılarından günlük yolcu sayısına geçiş yapılmış, günlük yolcu sayıları ve nüfus değerleri kullanılarak her bir araç sınıfı için verimlilik değerleri hesaplanmıştır (Verimlilik= [günlük yolcu sayısı / nüfus]*100). Baz yıl olan 2016 yılı ve sonrasındaki iki yıla ait verimlilik değerlerinin ortalaması alınmış ve sonraki yıllarda da bu verimlilik değerinin geçerli olacağı varsayımı yapılmıştır. Verimlilik değerleri Metro, tramvay, föniküler-teleferik ve Marmaray için sırasıyla 7,90, 3,20, 0,13 ve 1,18 olarak elde edilmiştir. Sonrasında nüfus ve hesaplanan verimlilik değerleri kullanılarak 2055 yılına kadar günlük yolcu projeksiyonu hesaplanmıştır (Günlük yolcu sayısı= Verimlilik*Nüfus/100). Günlük yolcu sayısından yıllık yolcu sayısına geçilmiştir.

Baz senaryo olması sebebiyle raylı sistem uzunluklarının değişmeyeceği ve yeni hatlar eklenmeyeceği varsayımı yapılmıştır. Hesaplanan yıllık yolcu projeksiyonu Çizelge 7.20’de verilmiştir.

Çizelge 7.20 : İstanbul demiryolu ulaşımı yolcu sayısı projeksiyonları (1000 yolcu)

Yıl	Metro	Tramvay	Föniküler-Teleferik	Marmaray
2016	403.179	165.041	8.354	62.612
2020	460.998	186.787	7.423	68.866
2025	531.087	215.186	8.552	79.336
2030	585.425	237.203	9.427	87.453
2035	614.986	249.180	9.903	91.869
2040	643.524	260.743	10.363	96.132
2045	670.943	271.853	10.804	100.228
2050	697.221	282.500	11.227	104.154
2055	722.195	292.619	11.629	107.885

Talep tahminleri PJ cinsinden hesaplanmıştır. Raylı sistemlere ilişkin yıllara sari elektrik tüketim verileri kWh olarak elde edilmiş ve PJ birimine çevrilmiştir. Çizelge 7.21’de verilmiş olan bu tüketimler Marmaray hattının elektrik tüketimini içermemektedir.

Çizelge 7.21 : İstanbul demiryolu ulaşımı yıllık elektrik tüketimleri.

Yıl	kWh	PJ
2002	48.930.224	0,1761
2003	56.745.349	0,2043
2004	57.979.910	0,2087
2005	62.018.594	0,2233
2006	68.431.076	0,2464
2007	76.799.912	0,2765
2008	87.957.843	0,3166
2009	102.738.747	0,3699
2010	126.712.760	0,4562
2011	133.710.036	0,4814
2012	170.980.965	0,6155
2013	231.501.242	0,8334
2014	242.377.536	0,8726
2015	280.024.536	1,0081
2016	293.849.858	1,0579

Yolcu sayısına bağlı mevcut hatlarda sefer sayısının arttığı varsayımını yapılmış olup, yolcu başına birim elektrik tüketimi hesaplanmıştır. 2016 yılı için yolcu başına 1,84 TJ olarak belirlenen birim elektrik tüketimi ve hesaplanan yolcu sayısı değerleri kullanılarak talep tahminleri gerçekleştirilmiştir. Metro, Tramvay, Marmaray ve Funiküler-Teleferik olmak üzere dört farklı kategoride hesaplanan talep tahminleri Çizelge 7.22’de verilmiştir.

Çizelge 7.22 : İstanbul demiryolu ulaşımı talep tahminleri, PJ.

Yıl	Metro	Tramvay	Füniküler-Teleferik	Marmaray
2016	0.7397	0.3028	0.0153	0.1149
2020	0.8458	0.3427	0.0136	0.1264
2025	0.9242	0.3744	0.0149	0.1381
2030	0.9744	0.3948	0.0157	0.1456
2035	1.0741	0.4352	0.0173	0.1605
2040	1.1283	0.4572	0.0182	0.1686
2045	1.1807	0.4784	0.0190	0.1764
2050	1.2310	0.4988	0.0198	0.1839
2055	1.2792	0.5183	0.0206	0.1911

7.2.4 Emisyon faktörleri ve verimlilik değerleri

Emisyon faktörleri, yakıt tüketim vb. aktivite verilerinin emisyonlara dönüştürülmesini sağlayan katsayılardır. Ulaştırma sektörünün ülkemize özgü emisyon faktörlerine ilişkin güncel veriler mevcut değildir. Bu sebeple, yapılan çalışmalarda genellikle IPCC emisyon faktörleri veya literatürde yer alan çalışmalardan derlenen veriler kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, sera gazı

emisyonları ile birlikte diğer hava kirleticiler parametreler de modellenmiştir. Emisyon faktörleri belirlenirken, ülkemizde gerçekleştirilmiş olan proje çalışmalarının sonuçlarından, tamamlanmış tez çalışmalarından, araç türlerine göre detaylı verilerin elde edilebildiği veritabanlarından, Ulusal Envanter Raporu (NIR) ve CRF tablolarından, yayımlanmış ulusal ve uluslararası çeşitli raporlardan, EPA veritabanı ve literatürde yer alan çalışmalardan yararlanılmıştır. Bu kaynaklardan yakıt tüketim verileri ve birim emisyon değerleri derlenerek emisyon faktörleri ve verimlilik değerleri hesaplanmıştır.

Modele girilecek olan emisyon faktörleri kt/PJ birimine sahip olmalıdır. Bu sebeple, g/km, kg/LTO veya kg/ton yakıt biriminde verilen emisyon faktörleri, yakıtların net kalori değerleri (TJ/kt), kesafet (yoğunluk) değerleri (kg/L) ve ortalama yakıt tüketim değerleri kullanılarak uygun birime dönüştürülmüştür. Ulaşımda kullanılan yakıtların net kalori ve yoğunluk değerleri Çizelge 7.23'te verilmektedir (EPDK, 2019; OPET, 2018; Soruşbay ve Karahan, 2009).

Çizelge 7.23 : Ulaşımda kullanılan yakıtların net kalori ve yoğunluk değerleri (EPDK, 2019; OPET, 2018; Soruşbay ve Karahan, 2009).

Yakıt	Net Kalori Değerleri (TJ/kt)	Yoğunluk Değeri (kg/L)
Benzin	44,80	0,747
Jet Yakıtı	44,59	0,794
Dizel	43,33	0,833
LPG	47,31	0,560
CNG	45,22	0,426
Denizcilik Motorini	43,33	0,845
Fuel Oil	40,19	0,998

Teknolojilerin verimlilik değerleri ise talep birimi/PJ cinsinden hesaplanmaktadır. Demiryolu, Havayolu ve Denizyolu için talepler PJ biriminde hesaplandığı için verimlilik değerleri PJ/PJ, karayolu için ise Bv-km/PJ şeklinde hesaplanmıştır. Karayolu için yakıtların kalori değerleri, yakıt yoğunluğu ve ortalama yakıt tüketim verileri de kullanılarak Bv-km/PJ olacak şekilde verimlilik değerleri hesaplanmıştır. Araçların ortalama yakıt tüketimleri ve verimlilik değerleri Çizelge 7.24'de verilmektedir. (EMEP, 2019; Sarıca ve diğ., 2019; Coşaran, 2018; Ölçer, 2017; EPA, 2016; Rabbi ve diğ., 2016; IPCC, 2003; Martin ve Smith, 2003)

Çizelge 7.24 : Araçların ortalama yakıt tüketimi ve verimlilik değerleri.

Yıl	Yakıt Tüketimi (L/100km)				Verimlilik Değerleri (Bv-km/PJ)			
	Benzin	Dizel	LPG	CNG	Benzin	Dizel	LPG	CNG
Otobüs	38,5	52,3	85,1	40,0	0,08	0,05	0,04	0,13
Otomobil	8,5	6,1	11,2	21,1	0,36	0,46	0,34	0,25
Kamyonet	14,6	11,5	35,0	-	0,20	0,24	0,11	-
Minibüs	14,6	11,5	35,0	-	0,20	0,24	0,11	-
Motorsiklet	5,0	-	-	-	0,60	-	-	-
Metrobüs	-	57,0	-	-	-	0,05	-	-
Kamyon	30,9	29,9	40,7	23,2	0,10	0,09	0,09	0,22
Traktör	78,5	69,1	-	-	0,04	0,04	-	-
Diğer	9,5	8,5	13,5	21,1	0,31	0,33	0,28	0,25

Ulusal uçaklar için yakıt tüketim değeri 850 kg/LTO, uluslararası uçaklar için 2500 kg/LTO'dur. Benzinli ve dizel yakıtlı otomobiller için verilen değerler ortalama değerlerdir. Emisyon sınıflarına göre yakıt tüketim değerleri ve verimlilik değerleri şu şekildedir:
Dizel otomobil yakıt tüketimleri (L/100km) NECS için 7,2, Euro1 ve Euro4 için 6,4, Euro5 için 5,4 ve Euro6 için 5.
Dizel otomobil verimlilik değerleri (Bv-km/PJ) NECS için 0,38, Euro1 ve Euro4 için 0,43, Euro5 için 0,51 ve Euro6 için 0,55.
Benzinli otomobil yakıt tüketimleri (L/100km) NECS için 11,2, Euro1 ve Euro4 için 8,7, Euro5 için 7,5 ve Euro6 için 6,6.
Benzinli otomobil verimlilik değerleri (Bv-km/PJ) NECS için 0,27, Euro1 ve Euro4 için 0,34, Euro5 için 0,40 ve Euro6 için 0,45.

Emisyon faktörleri g/km, kg/LTO veya kg/ton birimlerinde elde edilmiş ve her bir teknoloji için kt/PJ biriminde olacak şekilde hesaplanmıştır (TÜİK, 2021a; EMEP, 2019; Sarıca ve diğ., 2019; Coşaran, 2018; Ölçer, 2017; EPA, 2016; Rabbi ve diğ., 2016; Cuci & Ergün Polat, 2015; Yanarocak, 2007; IPCC, 2006; IPCC, 2003; Martin ve Smith, 2003; Url-6). Modele girilen emisyon faktörleri Çizelge 7.25'te görülmektedir. Dizel ve benzin yakıtlı otomobiller emisyon sınıfına göre ayrı ayrı modele girilmiş olup, tabloda ortalama emisyon faktörü verilmiştir. Elektrik üretimine ilişkin emisyon faktörlerinin hesaplanması için enerji denge tablolarından yararlanılmıştır. Hidrolik, rüzgar, jeotermal, güneş ve biyoyakıtlar yenilenebilir enerji kaynakları olarak ele alınmış olup, Mevcut durumda yaklaşık %34 olan yenilenebilir oranının %40, %60 ve %80 olması durumları için emisyon faktörleri hesaplanmıştır. ktCO₂e/TJ biriminde hesaplanan emisyon faktörleri mevcut durum için 124,9 olarak hesaplanmıştır. Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynağı payının %40, %60 ve %80 olması durumları için ise sırasıyla, 107,2, 73,6 ve 40,1 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 7.25 : Modelde kullanılan emisyon faktörleri, kt/PJ.

Teknolojiler	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	SO ₂ /SO _x	CO	PM	VOC/NMVOC
Gemi-Dizel	73,8518	0,0012	0,0018	1,8117	0,4616	0,1708	0,0669	0,0646
Gemi-Fuel-Oil	78,1971	0,0070	0,0020	1,9731	0,4976	0,1841	0,2824	0,0672
Uçak-Jet Yakıtı	70,7096	0,0079	0,0026	0,2691	0,0211	0,2137		0,0686
Uçak-Jet Yakıtı-UA	70,8679	0,0135	0,0018	0,3678	0,0224	0,4485		0,1346
Otobüs-CNG	56,0607	0,0920	0,0030	1,7969		0,5239	0,0017	0,7599
Otobüs/Metrobüs-Dizel	73,4297	0,0039	0,0039	0,6266	0,0005	0,1813	0,0165	0,0356
Otobüs-Benzin	69,3000	0,0250	0,0080	0,2030	0,0004	1,5717	0,0073	0,0549
Otobüs-LPG	63,0667	0,0620	0,0002	0,2394	0,0002	0,0006	0,0008	0,0272
Otomobil-CNG	56,0607	0,0920	0,0030	0,0166		0,0378	0,0003	0,0115
Otomobil-Dizel	73,5465	0,0097	0,0038	0,3358	0,0005	0,1803	0,0370	0,0392
Otomobil-Benzin	70,3011	0,0250	0,0080	0,1351	0,0004	2,0455	0,0008	0,2627
Otomobil-LPG	60,6616	0,0620	0,0002	0,0886	0,0002	0,4176	0,0006	0,1034
Kamyonet-Dizel	73,4297	0,0136	0,0037	0,2517	0,0005	0,0636	0,0110	0,0108
Kamyonet-Benzin	87,8871	0,0250	0,0080	0,0494	0,0004	1,0516	0,0005	0,0662
Kamyonet-LPG	63,0667	0,0620	0,0002	0,0284	0,0002	0,1336	0,0002	0,0331
Minibüs-Dizel	100,1012	0,0136	0,0037	0,2517	0,0005	0,0636	0,0110	0,0108
Minibüs-Benzin	87,8871	0,0250	0,0080	0,0494	0,0004	1,0516	0,0005	0,0662
Minibüs-LPG	63,0667	0,0620	0,0002	0,0284	0,0002	0,1336	0,0002	0,0331
Motosiklet-Benzin	69,3000	0,0250	0,0080	0,0905	0,0004	3,2112	0,0175	1,4877
Traktör-Dizel	73,4297	0,0039	0,0039	0,4746	0,0005	0,1373	0,0125	0,0270
Traktör-Benzin	69,3000	0,0250	0,0080	0,0996	0,0004	0,7712	0,0036	0,0269
Kamyon-CNG	56,0607	0,0920	0,0030	3,1042		0,9051	0,0030	1,3127
Kamyon-Dizel	73,4297	0,0039	0,0039	1,0968	0,0005	0,3174	0,0288	0,0623
Kamyon-Benzin	69,3000	0,0250	0,0080	0,2527	0,0004	1,9570	0,0091	0,0683
Kamyon-LPG	63,0667	0,0620	0,0002	0,0705	0,0002	0,6102	0,0019	0,0569

7.2.5 Maliyet Verilerinin Belirlenmesi

Maliyet, model için en kritik parametrelerden biri olup, çalışma kapsamında her bir teknoloji için ilk yatırım maliyeti ile işletme ve bakım maliyeti tanımlanmıştır. Maliyet parametreleri her bir alt sektör bazında talep birimine göre modele girilmiştir. Karayolu için Milyon \$/Bv-km biriminde verilen maliyetler havayolu, demiryolu ve denizyolu için Milyon \$/PJ biriminde olacak şekilde hesaplanmıştır. İskonto oranı model genelinde %10 olarak alınmıştır.

Karayolu maliyet hesaplamalarında Ford Otosan'dan sağlanan verilerin yanı sıra, araç türlerine göre fiyat araştırması yapılmış ve yakıt türlerine göre maliyet verileri derlenmiştir. Araç sayısı verileri ve yıllık talep değerleri kullanılarak yıllık ilk yatırım ve işletme ve bakım maliyetleri hesaplanmıştır (Çizelge 7.26)

Çizelge 7.26 : Karayolu araç türleri için modele girilen ortalama maliyet verileri.

Yıl	İlk Yatırım Maliyeti (2016 M\$/Bv-km)				İşletme ve Bakım Maliyeti (2016 M\$/ Bv-km)			
	Benzin	Dizel	LPG	CNG	Benzin	Dizel	LPG	CNG
Otobüs	7.924	7.971	8.480	11.589	422	422	486	616
Otomobil	1.558	1.781	1.949	2.102	39	39	35	35
Kamyon	10.205	12.762	12.810	13.212	512	282	512	512
Kamyonet	2.789	2.657	3.012	-	49	49	49	-
Minibüs	2.463	2.962	3.262	-	53	53	48	-
Traktör	943	1.039	-	-	67	37	-	-
Motorsiklet	1.544	-	-	-	39	-	-	-
Metrobüs	-	7.971	-	-	-	422	-	-

Hidrojen yakıtlı otobüs için ilk yatırım maliyeti 49.135 M\$/Bv-km, işletme ve bakım maliyeti 1.268 M\$/Bv-km'dir.

Hidrojen yakıtlı kamyon için ilk yatırım maliyeti 25.093M\$/Bv-km, işletme ve bakım maliyeti 141 M\$/Bv-km'dir.

Hidrojen yakıtlı otomobil için ilk yatırım maliyeti 6.009M\$/Bv-km, işletme ve bakım maliyeti 46 M\$/Bv-km'dir.

Elektrikli ve hibrit otomobiller için ilk yatırım maliyeti sırasıyla 4.382 ve 2.157M\$/Bv-km, işletme ve bakım maliyeti ise 33 ve 44 M\$/Bv-km'dir.

Karayolu teknolojilerinin yıllar itibariyle maliyetleri değişmekte olup, elektrikli ve hibrit araçların ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetlerinin 2055 yılında mevcut durumuna göre %20 azalacağı kabulü yapılmıştır. Hidrojen yakıtlı otomobiller ve otobüsler için bu değerin sırasıyla %40 ve %60 olacağı varsayımı yapılmıştır. Dizel, benzin, LPG ve CNG yakıtlı diğer tüm karayolu teknolojilerde ise %3 ile %11 arasında

değişen oranlarda fiyat artışı söz konusudur. Bu oranlar EPA veritabanı ve örnek çalışmalardan faydalanılarak belirlenmiştir.

Demiryolu maliyet hesaplamaları için hat uzunluğuna göre ilk yatırım maliyetleri İBB'nin ulaşım raporlarından derlenmiştir (İBB, 2018). İşletme ve bakım maliyetleri için ise daha önce yapılmış çalışmalardan yararlanılmıştır (Biol, 2014). Sonrasında demiryolu için yıllık maliyetler Çizelge 7.27'de verildiği gibi belirlenmiştir.

Çizelge 7.27 : Demiryolu araç türleri için modele girilen ortalama maliyet verileri (İBB,2018, Biol, 2014).

2016 M\$/PJ	Metro	Tramvay	Füniküler-Teleferik	Marmaray
İlk Yatırım	5.427	1.062	5.106	5.586
İşletme ve Bakım	288	288	288	288

Denizyolu maliyet hesaplamalarında gemi gruplarına ait ekonomik veriler elde edilmiş olup, ortalama ilk yatırım maliyeti 9 Milyon \$/taşıt olarak belirlenmiştir (Çoban ve Turan, 2018). Gemi sayıları ve yakıt tüketimi verileri de kullanılarak maliyet verileri uygun birimde elde edilmiştir. Modele denizyolu taşıtları için yıllık ilk yatırım maliyeti 324 M\$/PJ, işletme ve bakım maliyeti ise 17 M\$/PJ olarak girilmiştir.

Havayolu maliyet hesaplamalarında, tipine göre uçak fiyatları (Url-7) ile tiplerine göre uçak sayısı ve havayolu istatistikleri (TÜİK, 2021c) kullanılmıştır. Ortalama uçak ilk yatırım maliyeti 220 Milyon \$ olarak elde edilmiş olup, yurt içi ve yurt dışı uçuşlarına giden uçaklar için maliyet verileri aynı olarak kabul edilmiştir. İşletme ve bakım maliyetleri EPA veritabanında aynı teknolojiye ait maliyet verilerinden faydalanılarak oran ile hesaplanmıştır (EPA veritabanı "ilk yatırım maliyeti/işletme ve bakım maliyeti" oranı esas alınmıştır). Modele uçak için yıllık ilk yatırım maliyeti 692 M\$/PJ, işletme ve bakım maliyeti ise 6,4 M\$/PJ olarak girilmiştir. Hidrojen yakıtlı uçakların için ilk yatırım maliyeti ile işletme ve bakım maliyetinin jet yakıtlı araçlara göre %15 daha fazla olacağı varsayımı yapılmış (FCH ve Clean Sky 2, 2020) ve sırasıyla 796 M\$/PJ ve 7,3 M\$/PJ olarak alınmıştır.

7.3 Senaryo Analizleri

Çalışma kapsamında, mevcut durum senaryosu (baz senaryo) dışında İstanbul ve ulaşım sektörü için önemli olabilecek hususların ele alındığı çeşitli senaryo analizleri

gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda modelde ele alınan senaryolara ilişkin detaylı açıklama ve kabuller aşağıda açıklanmaktadır.

7.3.1 Mevcut durum senaryosu (Baz senaryo)

Mevcut durum senaryosu, baz senaryo ya da referans senaryo temel olarak, mevcut plan ve politikaların sürdürüldüğü, emisyon azaltımına yönelik yeni önlemlerinin alınmadığı ve mevcut eğilimin devam ettiği senaryo olarak tanımlanmaktadır. Önceki bölümlerde yapılmış olan hesaplamalar baz senaryo kapsamında ele alınmakta olup, yapılan kabuller detaylı olarak açıklanmıştır. Açıklanmış olan varsayımlara ek olarak değerlendirilen temel varsayımlar şu şekildedir:

- Daha fazla veriye erişilebilmesi sebebiyle baz yıl olarak 2016 yılı seçilmiştir.
- Teknolojilere ait verimlilik değerleri ve emisyon faktörlerinin baz yıl ile aynı olacağı varsayımı yapılmış, yıllara sari iyileştirme yapılmamıştır.
- Teknolojilere ait maliyet verileri dolar bazında modele girilmiş olup, yıllara göre değişiklik yapılmamıştır.

Mevcut durum senaryosu modelde “**BASE**” olarak tanımlanmıştır.

Model Kalibrasyonu

Kalibrasyonun temel amacı, belirlenen baz yıl için durum değişkenlerinin istatistiki veriler ile tutarlı olmasının sağlanmasıdır. Bu hedefin gerçekleştirilmesi, modeldeki tüm harici değişkenlerin ayrı ayrı ayarlanması ile olmaktadır. Bu aşama modelin güvenilirliğinin artırılması açısından önem arz etmektedir

Model kalibrasyonu, İstanbul ulaşım sektörünün tüm özelliklerini modele yansıtmak için yapılmıştır. Kalibrasyon aşamasında farklı kaynaklardan gelen aynı verilerin tutarlılığının kontrol edilmesi önemlidir. Örneğin TÜİK ve İBB verilerinin karşılaştırılmış ve doğruluğu kontrol edilmiştir. Veri girişi sağlandıktan sonra, sonuçların baz yıl için açıklanan resmi istatistiksel verilerle tutarlılığı kontrol edilmiştir. Resmi envanter verileri ülke genelinde yayınlanmakta olup, bu değerler bazı varsayımlar yapılarak İstanbul için elde edilmiştir. Örneğin; dizel araçların% 22'sinin İstanbul'da olması sebebiyle ulaşım sektörü toplam motorin tüketiminin% 22'sinin İstanbul'da tüketildiği varsayılmaktadır.

7.3.2 Karbon vergisi senaryoları

Karbon vergisi senaryoları ile karbon emisyonlarına getirilecek bir vergi ile teknoloji yatırımlarının ne yönde değişeceği, yakıt tüketimleri ve emisyon azaltım miktarlarının ne olacağının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, karbon vergisi senaryoları üç farklı şekilde incelenmiş olup bu senaryolar aşağıda sıralanmıştır:

CARBON_TAX_5: 2030 yılı itibariyle emisyon maliyeti ton başına 5\$ olacak şekilde bir karbon vergisi tanımlanmıştır.

CARBON_TAX_10: 2030 yılı itibariyle emisyon maliyeti ton başına 10\$ olacak şekilde bir karbon vergisi tanımlanmıştır.

CARBON_TAX_20: 2030 yılı itibariyle emisyon maliyeti ton başına 20\$ olacak şekilde bir karbon vergisi tanımlanmıştır.

7.3.3 Elektrikli ve hibrit araç senaryoları

ELC_HYB_MEDIUM: Orta büyüme senaryosu esas alınmıştır. Bu durumda, 2030 yılında İstanbul için tahmin edilen yaklaşık 4,75 milyon otomobilin %4'ünü (190.000) sırasıyla %45 ve %55 olacak şekilde elektrikli ve hibrit otomobillerin oluşturacağı varsayımı yapılmıştır (SHURA, 2019). 2016-2030 yılları arasında elde edilen artış oranları dikkate alınarak 2030-2055 yılları arasında da benzer bir eğilimin olacağı kabulü yapılmış olup, 2055 yılı itibariyle yaklaşık 296.000 hibrit otomobil ve 1.033.500 tam elektrikli otomobilin trafikte olması öngörülmüştür. Bu değer, toplam tahmin edilen otomobil sayısının %14'üne karşılık gelmektedir.

ELC_HYB_HIGH: Yüksek büyüme senaryosu esas alınmıştır. Bu durumda, 2030 yılında İstanbul için tahmin edilen yaklaşık 4,75 milyon otomobilin %10'unu (475.000) sırasıyla %55 ve %45 olacak şekilde elektrikli ve hibrit otomobillerin oluşturacağı varsayımı yapılmıştır (SHURA, 2019). 2016-2030 yılları arasında elde edilen artış oranları dikkate alınarak 2030-2055 yılları arasında da benzer bir eğilimin olacağı kabulü yapılmış olup, 2055 yılı itibariyle yaklaşık 815.500 hibrit otomobil ve 2.500.000 tam elektrikli otomobilin trafikte olması öngörülmüştür. Bu değer, toplam tahmin edilen otomobil sayısının %35'ine karşılık gelmektedir.

ELC_HYB_VERY-HIGH: Çok yüksek büyüme senaryosu esas alınmıştır. Bu durumda, 2030 yılında İstanbul için tahmin edilen yaklaşık 4,75 milyon otomobilin %20'sinin (950.000) sırasıyla %60 ve %40 olacak şekilde elektrikli ve hibrit otomobillerin oluşturacağı varsayımı yapılmıştır. 2016-2030 yılları arasında elde edilen artış oranları dikkate alınarak 2030-2055 yılları arasında da benzer bir eğilimin olacağı kabulü yapılmış olup, 2055 yılı itibariyle yaklaşık 1.167.500 hibrit otomobil ve 5.500.000 tam elektrikli otomobilin trafikte olması öngörülmüştür. Bu değer, toplam tahmin edilen otomobil sayısının %70'ine karşılık gelmektedir.

FOSSIL_BAN: Dizel ve benzinli otomobillerin 2030 yılı itibariyle satışının yasaklanması ve bu araçlar yerine elektrikli ve hibrit otomobillerin tercih edilmesi durumu incelenmiştir.

ELC_RAILWAY: İstanbul için planlanmış olan demiryolu ağları modele dahil edilmiş ve raylı sistemlerin diğer toplu taşıma türlerinden çekeceği talebin emisyonlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. 2016 yılında 95,7 km Metro, 36,6 km Tramvay, 1,9 km Funiküler-Teleferik ve 13,6 km Marmaray olmak üzere toplamda yaklaşık 146 km hat uzunluğu bulunmakta olup bu değer 926 km'ye ulaşması beklenmektedir.

7.3.4 Emisyon limit senaryoları

EMS_LIMIT_10: Baz senaryoya oranla artış üzerinden 2055 yılında %10 sera gazı emisyon azaltımı olacak şekilde bir emisyon sınırı koyulmuş olup, böyle bir kısıt altında modelin hangi yakıt ve teknolojilere yöneleceği analiz edilmiştir.

EMS_LIMIT_30: Baz senaryoya oranla artış üzerinden 2055 yılında %30 sera gazı emisyon azaltımı olacak şekilde bir emisyon sınırı koyulmuş olup, böyle bir kısıt altında modelin hangi yakıt ve teknolojilere yöneleceği analiz edilmiştir.

EMS_LIMIT_50: Baz senaryoya oranla artış üzerinden 2055 yılında %50 sera gazı emisyon azaltımı olacak şekilde bir emisyon sınırı koyulmuş olup, böyle bir kısıt altında modelin hangi yakıt ve teknolojilere yöneleceği analiz edilmiştir.

7.3.5 Verimlilik senaryosu

Baz senaryo kapsamında araçların verimlilik değerlerinin gelecekte de mevcut durum ile aynı olacağı varsayımı yapılmıştır. Öte yandan, araç teknolojileri gün geçtikçe

yenilenmekte ve daha verimli emisyon sınıfına sahip araçlar üretilmektedir. Bu sebeple, daha verimli motor teknolojilerinin kullanılmasıyla birlikte yakıt tüketimlerinde meydana gelecek azalmanın yanı sıra araçların daha az emisyon salması öngörülmektedir. Ülkemizde gerçekleştirilmiş olan bir çalışma kapsamında 2015 yılına oranla, 2050 yılında araç verimliliklerinde yaklaşık %9'luk bir artış öngörülmüştür (Sarıca ve diğ., 2019). Ayrıca, EPA'nın 1975-2018 yıllarını kapsayan verilerine göre son 30 yılda ortalama emisyon faktörlerinde %13'lük bir azalma gerçekleşmiştir. Bu sebeple, bu senaryo kapsamında 2016-2055 yılları arasında karayolu motorlu taşıtların verimlilik değerlerinde %15 artış olacağı kabulü yapılmıştır.

EFFICIENCY: 2055 yılına kadar karayolu ulaşımı teknolojilerine ait verimlilik değerlerinde %15 artışın emisyon salımı üzerine olan etkileri incelenmiştir. Bu verimlilik artışı yıllara sari doğrusal olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

7.3.6 Hidrojen yakıtlı araç senaryoları

Hidrojen yakıtlı araç senaryoları ile hidrojen yakıt hücreli araçların modele dahil edilmesi durumunda, yakıt tüketimleri ve emisyon azaltım miktarlarının ne olacağının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, hidrojen yakıtlı araç senaryoları üç farklı şekilde incelenmiş olup bu senaryolar aşağıda sıralanmıştır:

HYDROGEN-10: 2035 yılı itibarıyla hidrojen yakıtlı uçak, otomobil, otobüs ve kamyon teknolojileri modele dahil edilmiş olup, 2055 yılına kadar bu araçların kendi sınıflarında talebin %10'una karşılık gelen miktarı karşılayacağı varsayımı yapılmıştır.

HYDROGEN-20: 2035 yılı itibarıyla hidrojen yakıtlı uçak, otomobil, otobüs ve kamyon teknolojileri modele dahil edilmiş olup, 2055 yılına kadar bu araçların kendi sınıflarında talebin %20'sine karşılık gelen miktarı karşılayacağı varsayımı yapılmıştır.

HYDROGEN-30: 2035 yılı itibarıyla hidrojen yakıtlı uçak, otomobil, otobüs ve kamyon teknolojileri modele dahil edilmiş olup, 2055 yılına kadar bu araçların kendi sınıflarında talebin %30'una karşılık gelen miktarı karşılayacağı varsayımı yapılmıştır.

7.3.7 Toplu önlem senaryosu

Yukarıda sıralanmakta olan senaryolarda alınan önlemler veya kısıtlamalar ayrı ayrı incelenmiş ve senaryoların bireysel olarak etkilerinin değerlendirmeleri amaçlanmıştır. Bu senaryolar bazında, sektör için elde edilebilecek maksimum azaltım öngörüsünün değerlendirilebilmesi için birden fazla sera gazı emisyonu azaltım önlemi tek bir senaryoda bir araya getirilmiştir.

SUPER_SCENARIO: Bu senaryo kapsamında EFFICIENCY, ELC_RAILWAY, ELC_HYB_HIGH, FOSSIL BAN ve HYDROGEN-20 senaryoları toplu olarak ele alınarak değerlendirme yapılmıştır.



8. SONUÇLAR

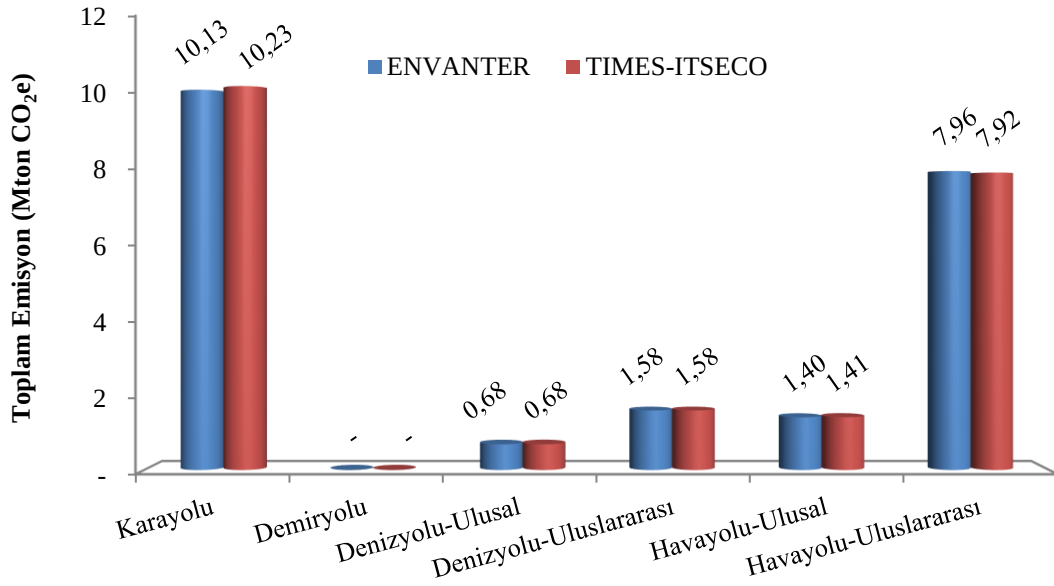
8.1 Envanter Sonuçları ile Karşılaştırma

Baz yıl için elde edilen model sonuçları, TÜİK tarafından her yıl hazırlanarak BMİDÇS Sekreteryası'na sunulanan ulusal envanter raporuna ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara ilişkin karşılaştırma Çizelge 8.1 ve Toplam emisyon sonuçlarının envanter ile karşılaştırılması Şekil 8.1'de görülmektedir.

Çizelge 8.1 : Emisyon türleri ve alt kategorilere göre model çıktısı ve envanter verilerinin karşılaştırması.

ENVANTER	SGE (kt)			Toplam SGE (Mton CO ₂ e)
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Karayolu	9.927	2,04	0,52	10,13
Demiryolu	-	-	-	-
Denizyolu-Ulusal	676	0,06	0,02	0,68
Denizyolu-Uluslararası	1.566	0,14	0,04	1,58
Havayolu-Ulusal	1.388	0,02	0,05	1,40
Havayolu-Uluslararası	7.897	0,06	0,22	7,96

TIMES-ITSECO	SGE (kt)			Toplam SGE (Mton CO ₂ e)
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Karayolu	10.005	2,12	0,58	10,23
Demiryolu	-	-	-	-
Denizyolu-Ulusal	679	0,02	0,02	0,68
Denizyolu-Uluslararası	1.568	0,13	0,04	1,58
Havayolu-Ulusal	1.387	0,16	0,05	1,41
Havayolu-Uluslararası	7.827	1,49	0,20	7,92



Şekil 8.1 : Toplam emisyon sonuçlarının envanter ile karşılaştırılması.

İstanbul’da demiryolu ulaşımında elektrik kullanılmaktadır. Bu sebeple, sera gazı emisyon salımı olmamaktadır. Emisyon toplamaları karşılaştırıldığında uluslararası denizyolu ve havayolu taşımacılığını dahil etmemiz durumunda toplamda model ve envanter arasında yalnızca %0,30 fark elde edilmiştir. Uluslararası denizyolu ve havayolu taşımacılığının dahil edilmediği durumda ise bu fark %0,85 olarak elde edilmiştir. Her iki durum için de model sonuçları ile envanter sonuçları birbirine oldukça yakındır. Mevcut farkların olası sebepleri, emisyon faktörlerinin tamamen aynı olmaması, envanterden İstanbul’a ait emisyonların toplam emisyonlardan oran yolu ile çekilmesi sonucu tam olarak gerçeği yansıtmaması olasılığı ile teknoloji kapasitelerinin hesaplanmasında yapılan kabuller vb. olarak sıralanabilir.

8.2 Yakıt Tüketimi

Yakıt tüketimi sonuçları uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği (UA Dahil) ve dahil edilmediği (UA dahil değil) durumlar için ayrı ayrı değerlendirilmiş olup, detaylar aşağıda yer almaktadır.

8.2.1 Baz Senaryo

Baz senaryonun çalıştırılması ile elde edilen yakıt tüketimi sonuçları Çizelge 8.2 ve Şekil 8.2’de verilmiştir. 2016 yılında toplamda 167 PJ olan yakıt tüketimi 2055 yılında 3,2 kat artış ile 533 PJ’a yükselmiştir. Bu değerler uluslararası denizyolu ve havayolu taşımacılığının modele dahil edilmediği durum için geçerlidir.

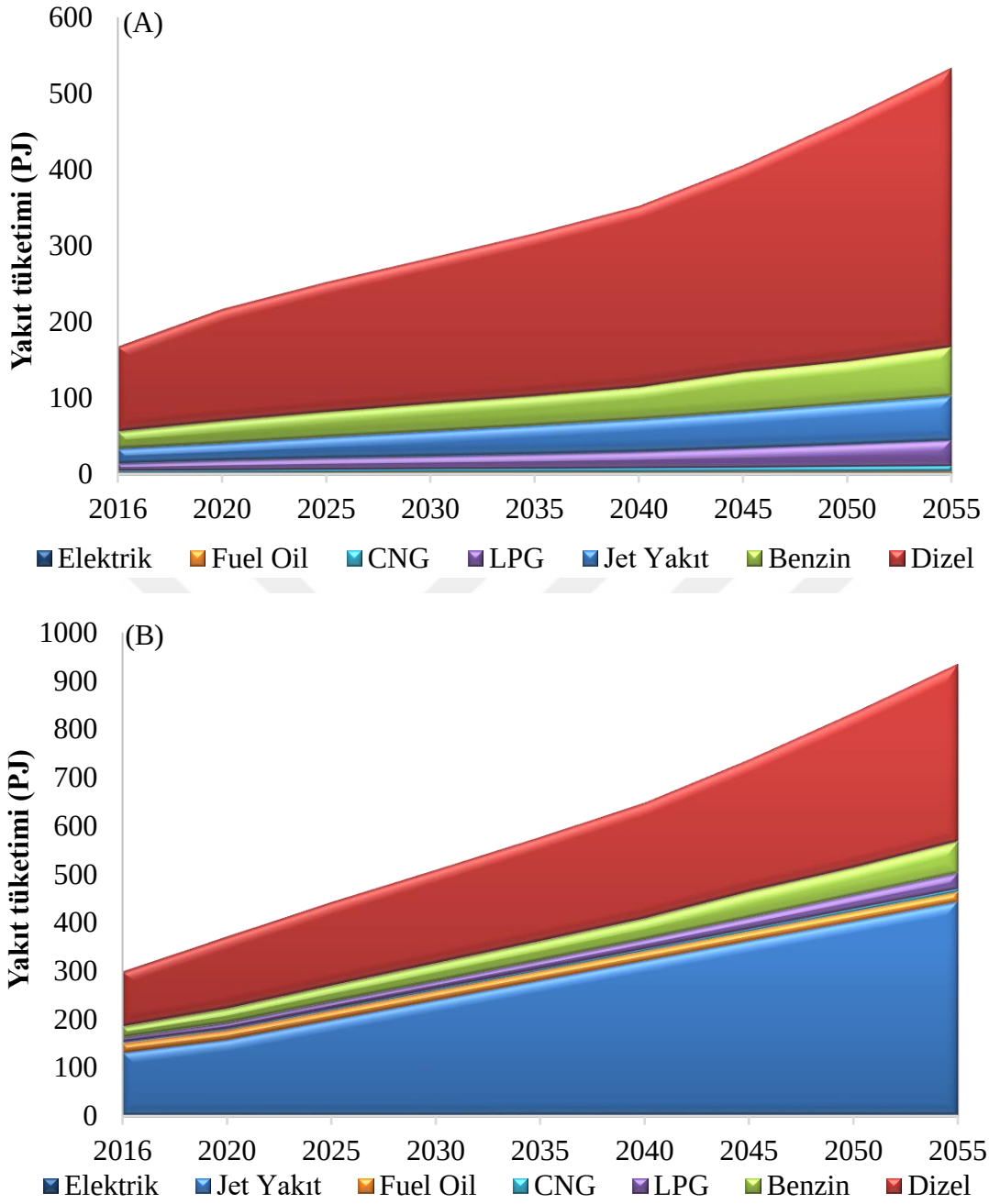
Çizelge 8.2 : Baz senaryo yakıt tüketimleri, PJ/yıl.

Alt kategori	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	183	212	237	264	294	342	398	459
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	240	276	311	347	382
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Alt kategori bazında yakıt tüketimi sonuçları incelendiğinde, yakıt tüketiminin büyük çoğunluğunu %82 ile karayolunun oluşturduğu görülmektedir. Bu oranı % 12 ile havayolu ve %5 ile denizyolu takip etmektedir. Demiryolu kaynaklı elektrik tüketimi ise %1 ile en düşük paya sahiptir.

Yakıt türleri incelendiğinde ise dizel tüketiminin mevcut durumda oldukça baskın olduğu ve yıllar itibariyle toplam yakıt tüketimi içerisindeki payının da arttığı görülmektedir. 2016 yılında toplam yakıt tüketiminin %66,4'ünü oluşturan dizel tüketim oranı, 2055 yılında %68,7'ye çıkmıştır. Öte yandan, benzin tüketimi oranı ise %13,5'ten %12,10'a gerilemiştir.

Toplam yakıt tüketiminin %41'ini otomobiller oluşturmaktadır. Bu değeri %17 ile kamyonet, %12 ile otobüs ve uçak takip etmektedir. Uluslararası uçuşların bu değerlendirmeye dahil olmaması sebebiyle uçaklara ait yakıt tüketimi oranı düşük görünmektedir.



Şekil 8.2 : Baz senaryo yakıt türüne göre tüketimler (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

Uluslararası denizyolu ve havayolu taşımacılığının modele dahil edildiği durumda ise 2016 yılında toplamda 298 PJ olan yakıt tüketimi 2055 yılında 3,1 kat artış ile 935 PJ'a yükselmiştir.

Alt kategori bazında yakıt tüketimi sonuçlarına göre, yakıt tüketiminin %46,1'i karayolu ulaşımından, %43,7'si ise havayolu ulaşımından kaynaklanmaktadır. Uluslararası havayolu ulaşımı değerlendirmeye dahil edildiğinde karayolu ulaşımı ile

başa baş bir yakıt tüketimi olduğu anlaşılmaktadır. Yine benzer şekilde uluslararası denizyolu taşımacılığı değerlendirmeye alındığında yakıt tüketimi oranının yaklaşık %10'a çıktığı görülmektedir.

Yakıt türleri incelendiğinde ise yine aynı şekilde uluslararası havayolu ulaşımının etkisi ile oldukça yükselen jet yakıtı tüketimi oranı 2016 yılında %43,7 ile en yüksek orana sahip olmuş, bu oran 2055 yılında %47'ye yükselmiştir. 2016 yılında toplam yakıt tüketiminin yaklaşık %38'ini oluşturan dizel tüketim oranı, 2055 yılında %39,3'e çıkmıştır. Öte yandan, benzin tüketimi oranı ise %7,6'dan %6,9'a gerilemiştir.

Toplam yakıt tüketiminin %44'ünü uçaklar oluşturmaktadır. Bu değeri %23 ile otomobil, %10 ile gemi, %9 ile kamyonet ve %7 ile otobüs takip etmektedir.

8.2.2 Karbon vergisi senaryoları

Karbon vergisi senaryolarının yakıt tüketimi sonuçları Çizelge 8.3 ile Şekil 8.3-Şekil 8.5'de verilmiştir.

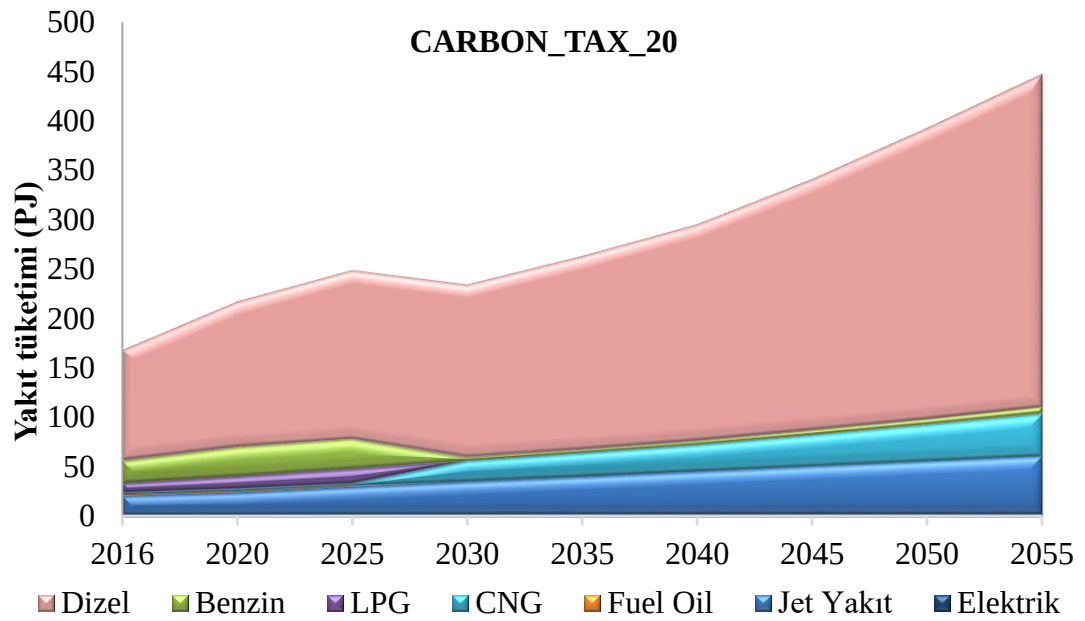
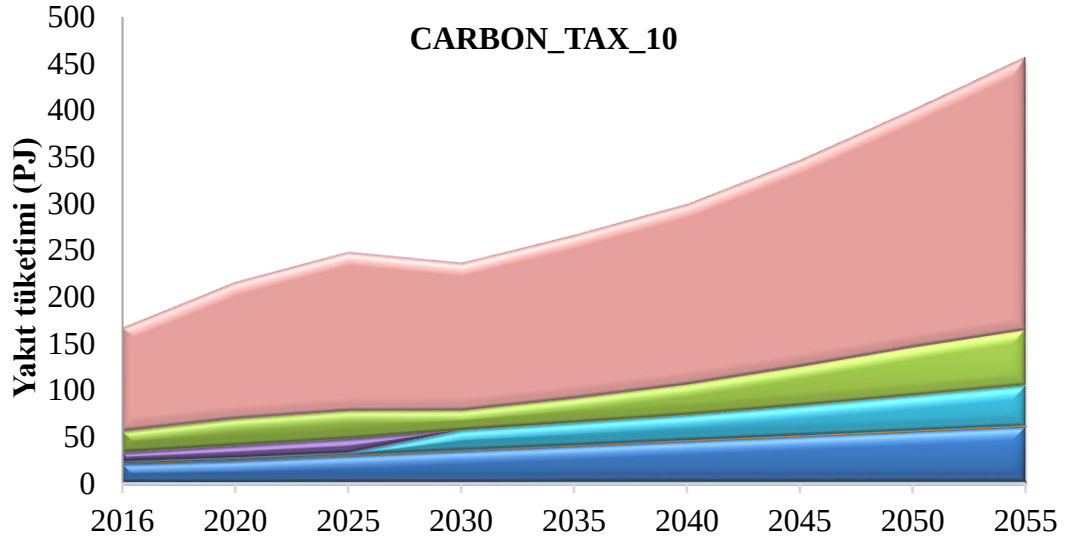
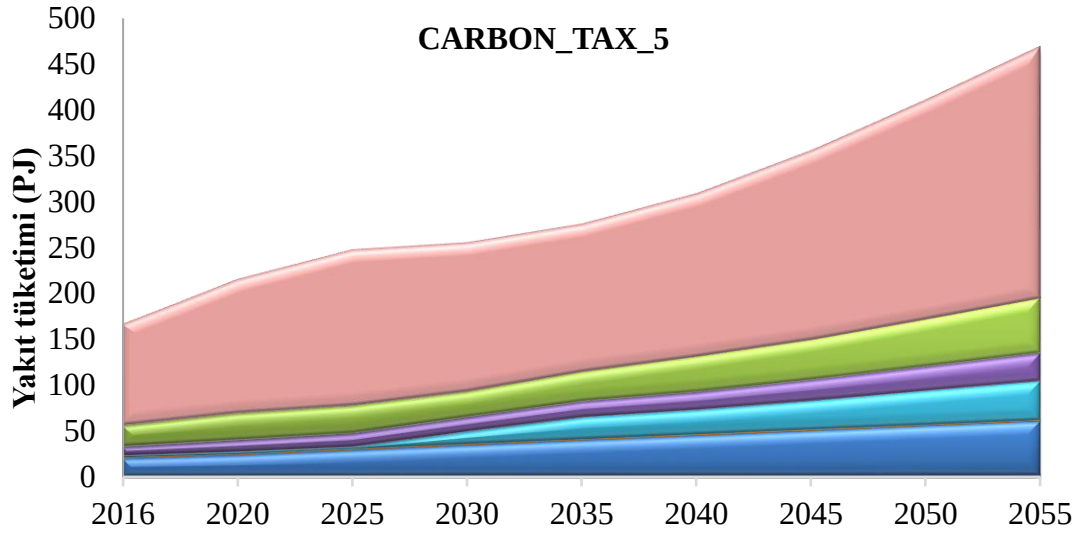
Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda alt kategori bazında yakıt tüketimi sonuçları incelendiğinde, karbon vergisi uygulamasının her üç senaryoda da karayolu ulaşımı kaynaklı yakıt tüketimini etkilediği görülmektedir. Bunun başlıca temel sebebi, modelin karayolu alt kategorisinde daha esnek bir yapıya sahip olmasıdır. Örneğin; baz senaryoda 2055 yılında 7 PJ olan CNG tüketimi karbon vergisi getirilmesi durumunda 42 PJ üzerinde çıkmıştır.

Şekil 8.3'te yakıt tüketimlerinde meydana gelen değişim görülmektedir. Genel olarak üç senaryoda da karbon vergisinin getirildiği 2030 yılında dizel tüketiminde bir düşüş olduğu görülmekte, karbon vergisinin en yüksek olduğu senaryoda LPG tüketiminin sıfırlandığı ve benzin tüketiminin de ciddi oranda düştüğü görülmektedir. Model diğer fosil yakıtlar yerine daha düşük emisyon faktörü olan CNG yakıtlı araçlara yönelmiş olup, 2055 yılında CARBON_TAX_20 senaryosunda optimum koşulları LPG ve benzini azaltıp, dizel ve CNG'yi arttırarak yakalamıştır. Elektrik ve Hidrojen yakıtlı araç tercih edilmeyişinin sebebi ise, baz senaryo koşullarında sadece karbon vergilerinin etkisinin incelenmesi amacıyla bu teknolojilerinin senaryolara dahil edilmemesidir.

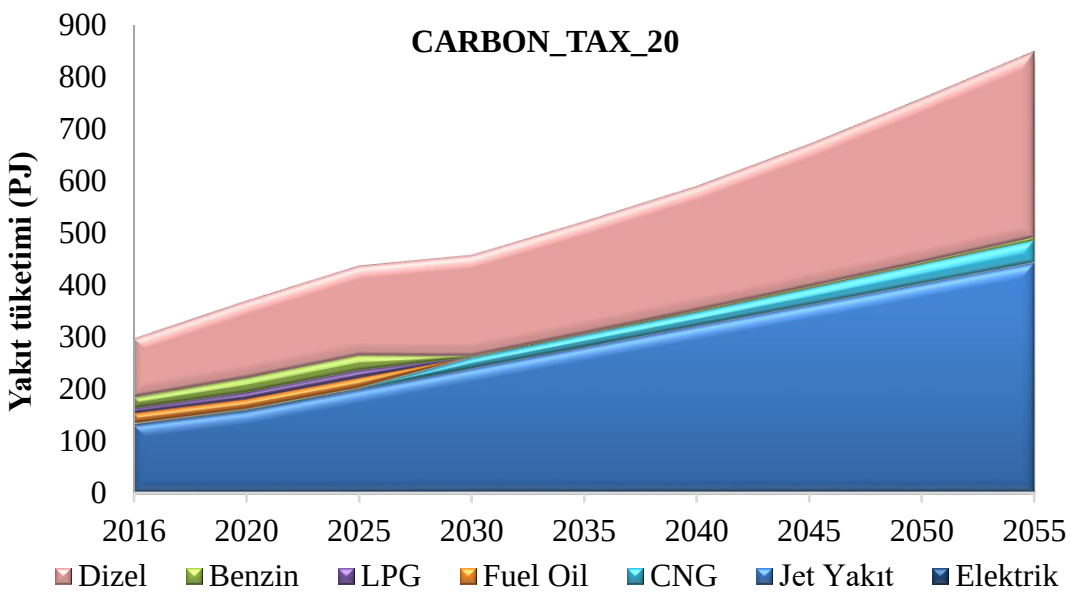
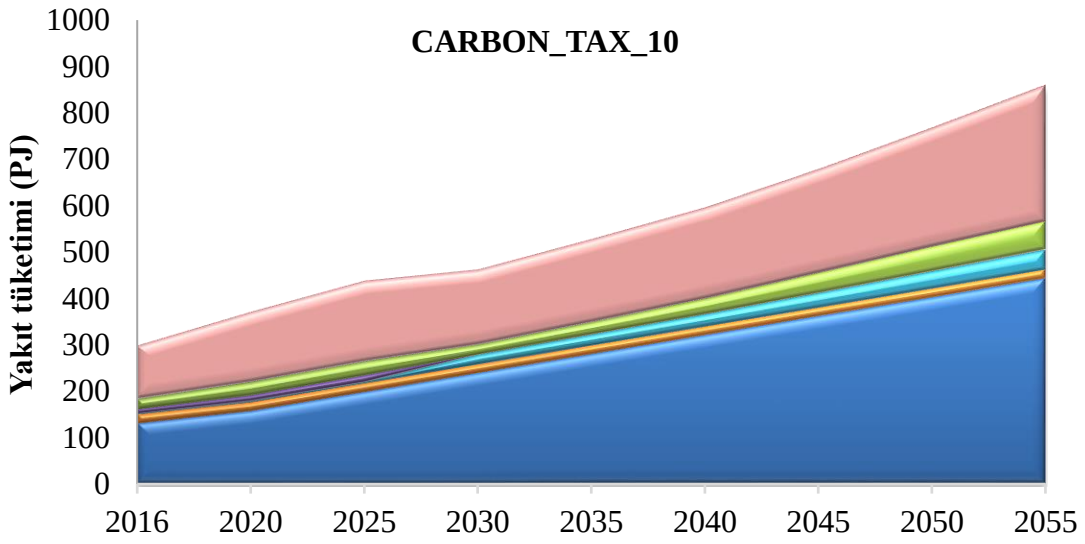
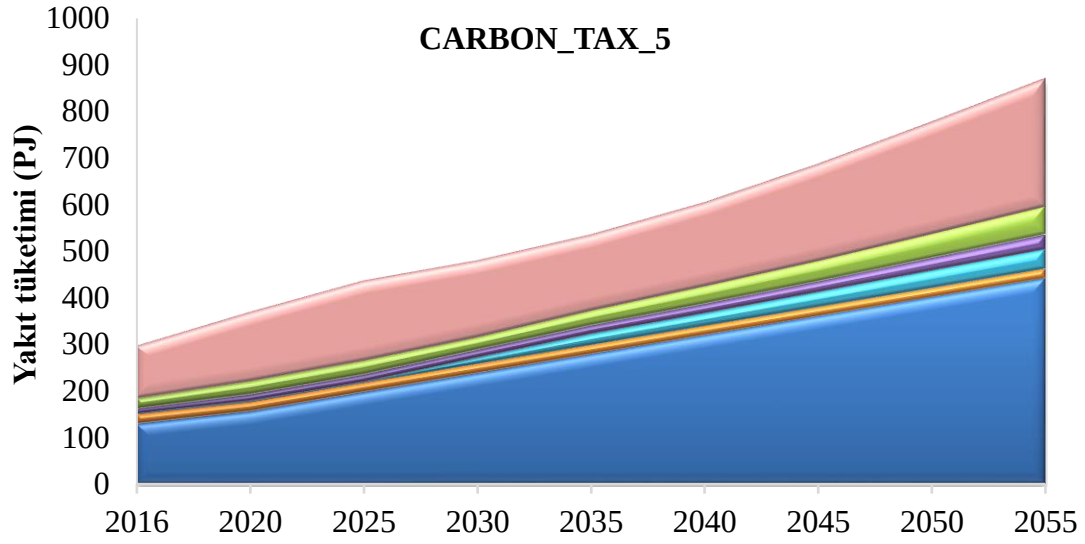
Çizelge 8.3 : Karbon vergisi senaryoları yakıt tüketimleri, PJ/yıl.

CARBON_TAX_5	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	183	209	210	225	252	293	343	395
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	240	276	311	347	382
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20
CARBON_TAX_10	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	183	209	191	215	243	284	332	383
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	240	276	311	347	382
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20
CARBON_TAX_20	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	183	209	188	211	237	277	324	373
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	240	276	311	347	382
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda verilen alt kategori bazında yakıt tüketimi sonuçları incelendiğinde, yine karbon vergisi uygulamasının her üç senaryoda da karayolu ulaşımı kaynaklı yakıt tüketimini etkilediği görülmektedir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda yakıt tüketimlerinde meydana gelen değişim Şekil 8.4’te görülmektedir. Genel olarak üç senaryoda da karbon vergisinin getirildiği 2030 yılında dizel tüketiminde bir düşüş olduğu görülmekte, karbon vergisinin yüksek olduğu senaryoda LPG tüketiminin sıfırlandığı ve benzin tüketiminin de ciddi oranda düştüğü görülmektedir. Model diğer fosil yakıtlar yerine daha düşük emisyon faktörü olan CNG yakıtlı araçlara yönelmiş olup, 2055 yılında CARBON_TAX_20 senaryosunda optimum koşulları LPG ve benzini azaltıp, dizel ve CNG’yi arttırarak yakalamıştır. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmesi durumunda elde edilen sonuçlarda yaşanan tek fark özellikle uluslararası havayolu ulaşımı kaynaklı jet yakıtı tüketiminin toplam yakıt tüketimi miktarını neredeyse 2 katına çıkarması ve hesaplanan azaltım oranlarını etkilemesidir.

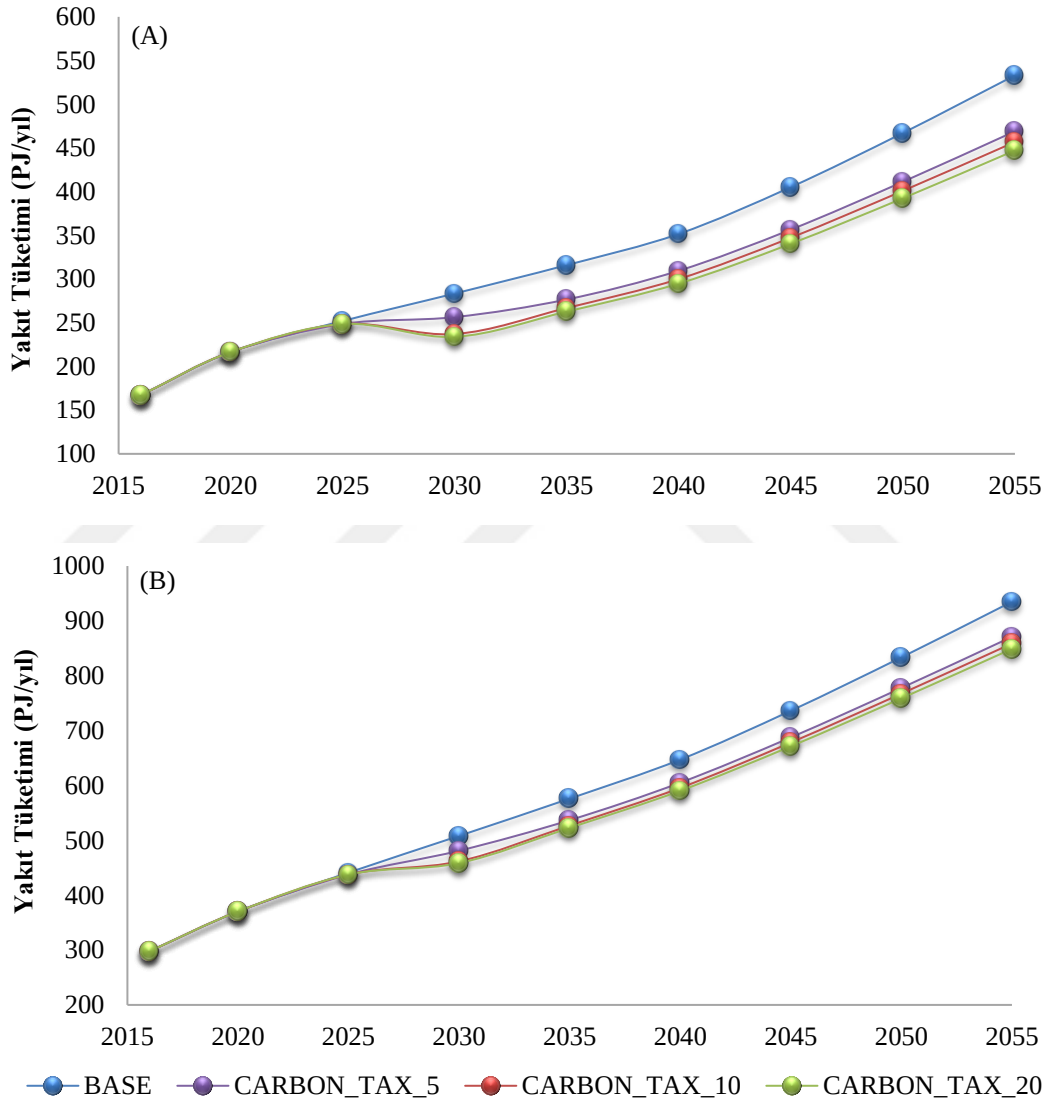


Şekil 8.3 : Karbon vergisi senaryoları yakıt türüne göre tüketimler.



Şekil 8.4 : Karbon vergisi senaryoları yakıt türüne göre tüketimler, UA dahil.

Baz senaryoya göre yakıt tüketimindeki azaltım miktarları uluslararası ulaşımın dahil edildiği ve edilmediği durumlar için Şekil 8.5'te gösterilmiştir. Bu kapsamda, uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının toplam tüketim içerisine dahil edilmediği durum için; ton başına 5\$, 10\$ ve 20\$ karbon vergisi getirildiğinde 2055 yılında baz senaryoya oranla sırasıyla %12, %14 ve %16 oranında yakıt tüketimlerinde azalma olmuştur. Bu oranlar uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmesi durumu için sırasıyla %7, %8 ve %9 olmuştur.



Şekil 8.5 : Karbon vergisi senaryoları yakıt tüketimi azaltım oranları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

8.2.4 Verimlilik ve emisyon limit senaryoları

Karayolu teknolojilerinde verimlilik artışı yapılan ve uluslararası havayolu ve denizyolu taşımacılığını da içeren toplam emisyonlara üst limit koyulan senaryoların

yakıt tüketimi sonuçları Çizelge 8.4 ile Şekil 8.6-Şekil 8.8’de verilmiştir. Alt kategori bazında yakıt tüketimlerine bakıldığında, verimlilik senaryosu için karayolu yakıt tüketiminde %13’lük bir azalma olduğu görülmektedir. Emisyonların ve yakıt tüketiminin büyük çoğunluğu karayolu ulaşımı sebebiyle yalnızca karayolu teknolojilerinde verimlilik artışına gidilmiştir. Bu sebeple, değişim sadece karayolu alt kategorisinde gerçekleşmiştir.

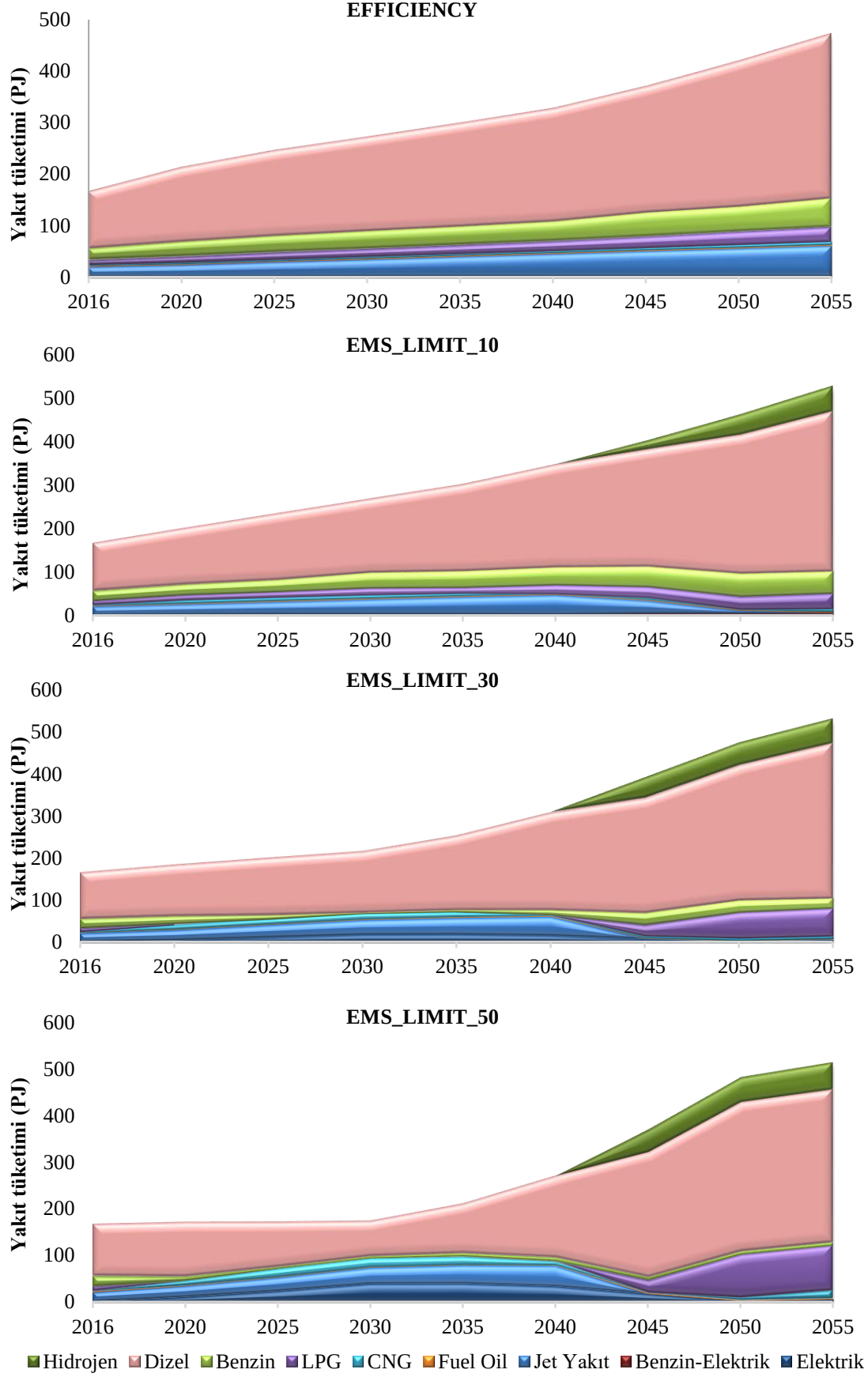
Çizelge 8.4 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları yakıt tüketimleri, PJ/yıl.

EFFICIENCY	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	181	208	227	249	272	308	352	399
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	240	276	311	347	382
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20
EMS_LIMIT_10	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	168	196	223	251	290	340	394	454
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	240	276	311	347	382
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20
EMS_LIMIT_30	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	152	162	171	203	252	329	406	458
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	240	276	311	347	382
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20
EMS_LIMIT_50	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	138	132	128	159	213	307	413	440
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	240	276	311	347	382
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Emisyon limit senaryolarında da değişimin sadece karayolu yakıt tüketiminde olduğu anlaşılmakta olup, aslında havayolu ulaşımında da önemli değişiklikler olmuştur. Havayolu ulaşımı talep biriminin PJ olması sebebiyle, yakıt tüketiminde meydana

gelen farklılıklar toplu ele alındığında net görülememektedir. Yakıt türü detayında inceleme yapıldığında modelin tercihlerindeki farklılık daha net olarak görülebilmektedir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda alt kategori bazında yakıt tüketimlerine bakıldığında farklı olarak havayolu ve denizyolu yakıt tüketimlerinde artış olmuştur.





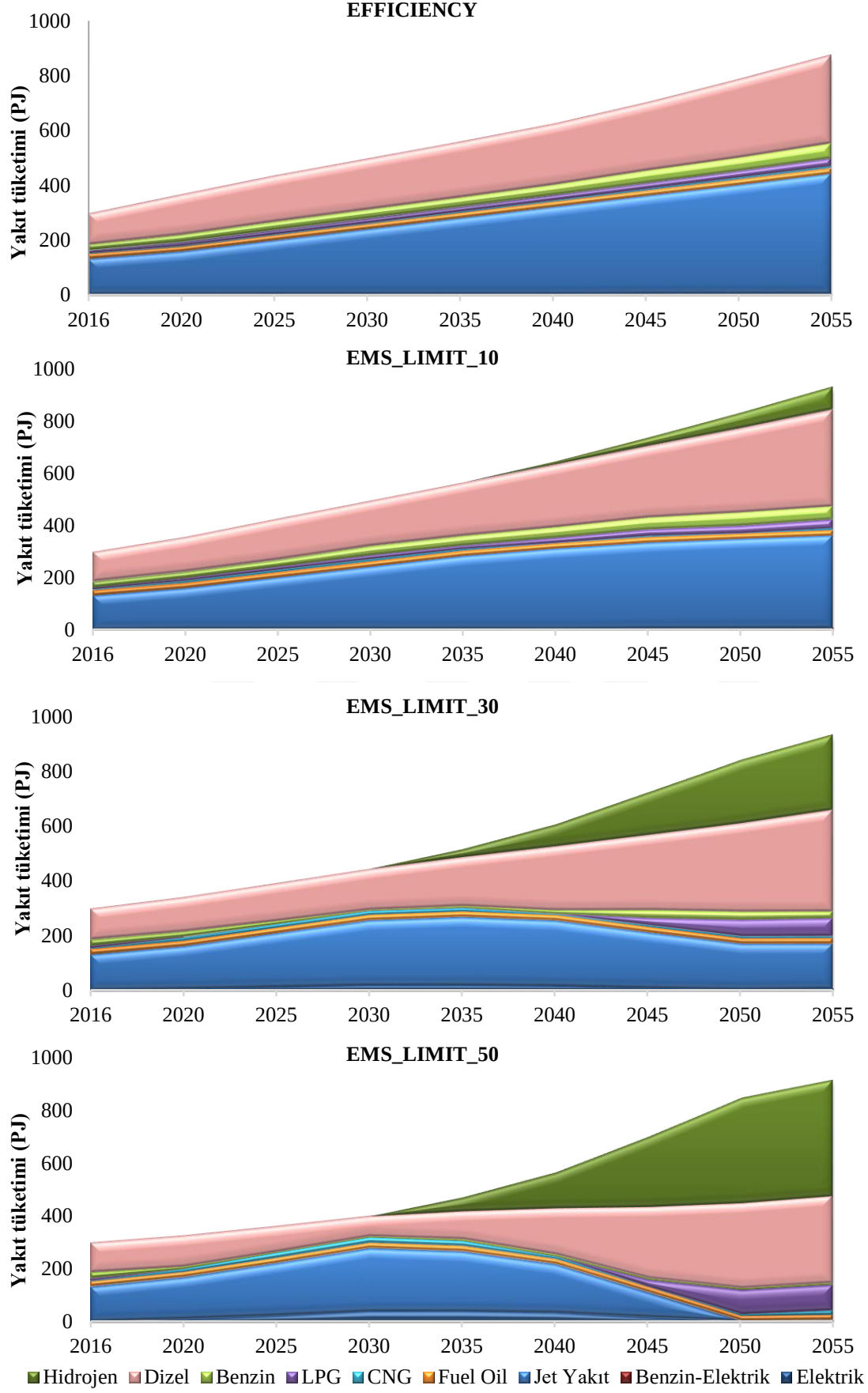
Şekil 8.6 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları yakıt türüne göre tüketimler.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda emisyon limit senaryolarında jet yakıtının yerini hidrojen yakıtı, benzinli araçların yerini ise LPG'li araçlar almaktadır. Emisyon limit senaryolarında üst limit uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının da dahil olduğu toplam emisyonlar üzerinden yapıldığından etkisi diğer durumda daha fazla görülmektedir.

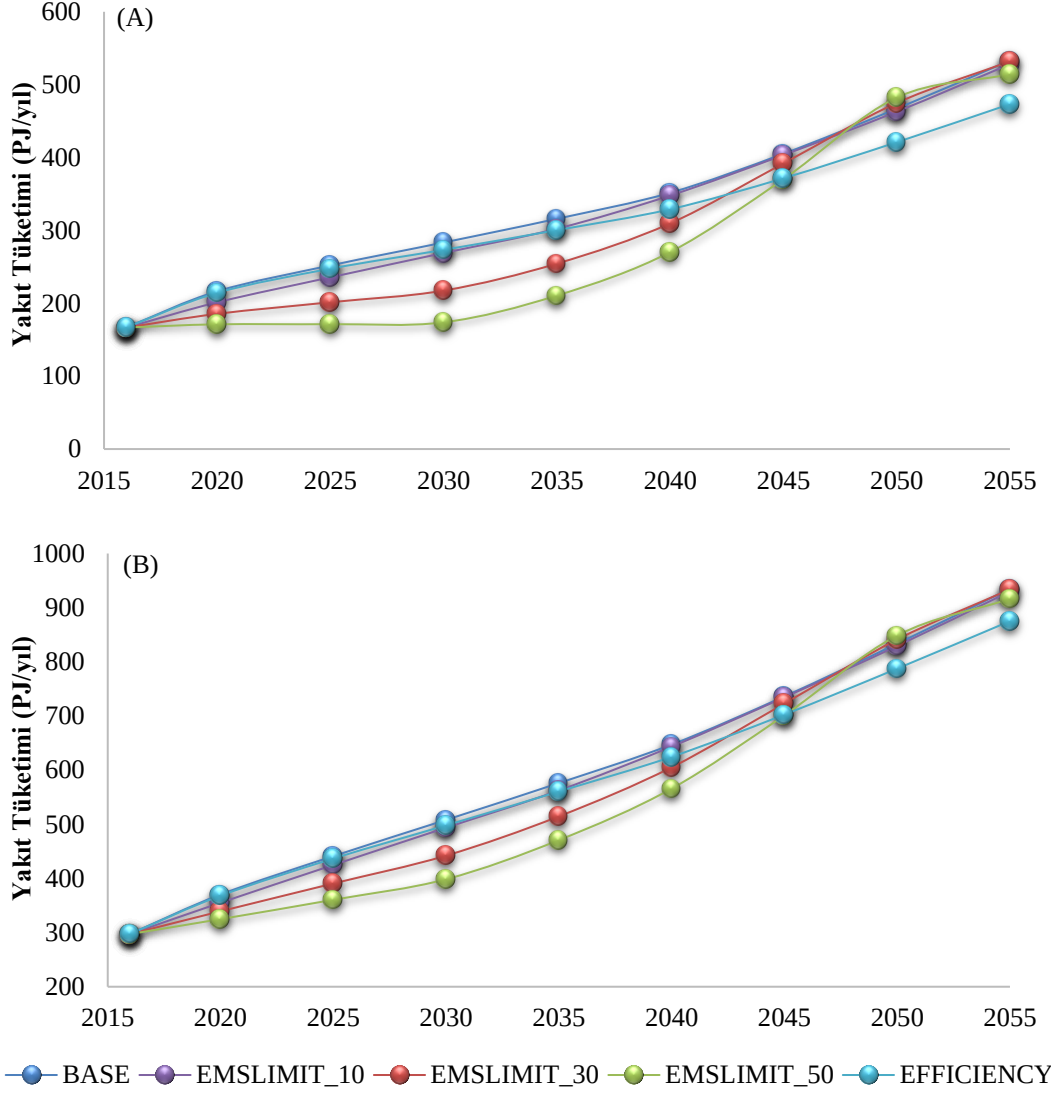
Emisyon limit senaryoları modelde baz senaryoya göre %50 emisyon azaltımı olana kadar çalıştırılabilmektedir. Model, mevcut teknolojileri ile %50'den fazla azaltım yapamamaktadır. Bu azaltımı yaparken de Şekil 8.7'dan da görülebileceği gibi jet yakıtını önemli ölçüde azaltıp, hatta son yıllarda sıfırlayıp hidrojen yakıtına yönelmektedir. Öte yandan, dizel ve benzin tüketimini azaltarak, CNG ve LPG yakıtlı araçlar ile elektrikli otomobillere olan talep artmıştır. Ancak, hidrojen yakıtının havayolu ulaşımında bu ölçüde kullanımının 2055 yılında dahi çok mümkün olmayabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda baz senaryoya göre yakıt tüketimindeki azaltım oranları oldukça düşük olup, EMSLIMIT_10, EMSLIMIT_30 ve EMSLIMIT_50 senaryoları için bu oranlar sırasıyla %0,9, %0,2 ve %3,5'tir. Verimlilik senaryosunda ise da baz senaryoya göre yakıt tüketimi azaltım oranı yaklaşık %11'dir

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda ise EMSLIMIT_10, EMSLIMIT_30 ve EMSLIMIT_50 senaryoları için bu oranlar sırasıyla %0,5, %0,1 ve %2'dir. Verimlilik senaryosunda ise yakıt tüketimi azaltım oranları %6,4 olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.7 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları yakıt türüne göre tüketimler, UA dahil.



Şekil 8.8 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları yakıt tüketimi azaltımları
(A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

8.2.5 Hidrojen yakıtlı araç senaryoları

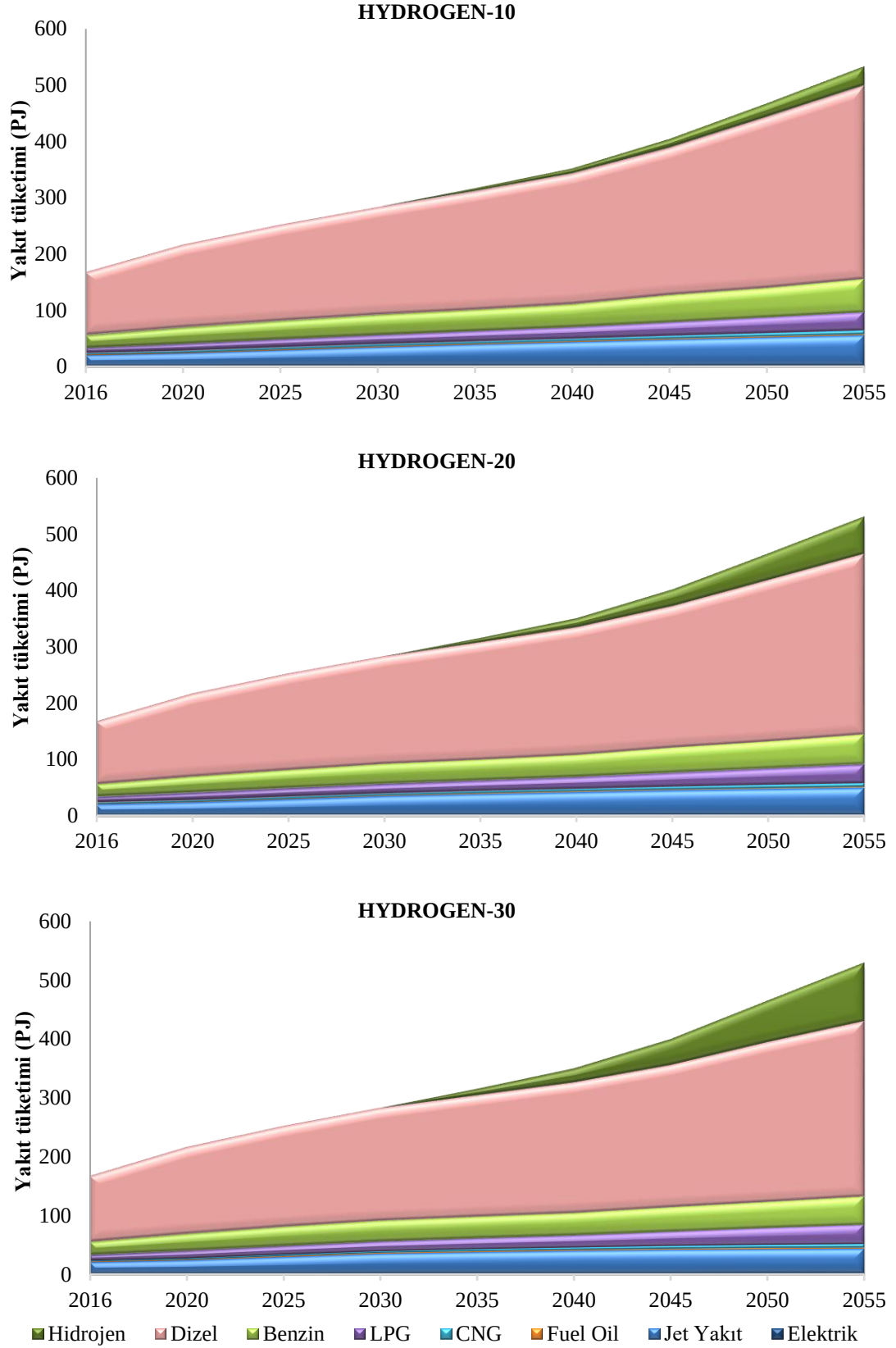
Hidrojen yakıtlı araç senaryolarının yakıt tüketimi sonuçları Çizelge 8.5 ile Şekil 8.9-Şekil 8.11’te verilmiştir. Alt kategori bazında yakıt tüketimi sonuçları incelendiğinde hidrojen yakıtının modelde uçak, otomobil, kamyon ve otobüslerde kullanılması sebebiyle her üç senaryoda da karayolu ve havayolu ulaşımı kaynaklı yakıt tüketiminin etkilendiği görülmektedir.

Çizelge 8.5 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları yakıt tüketimleri, PJ/yıl.

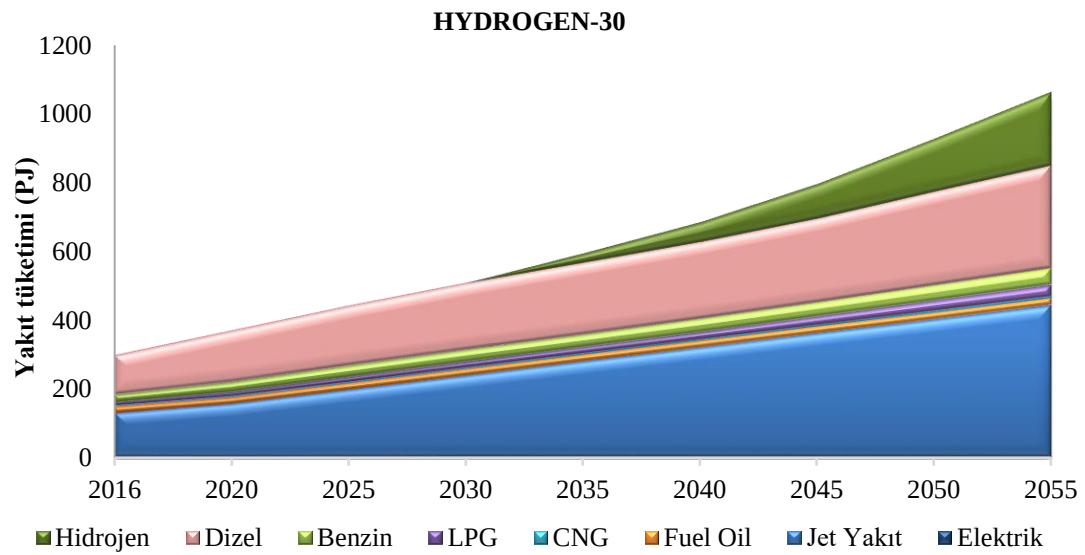
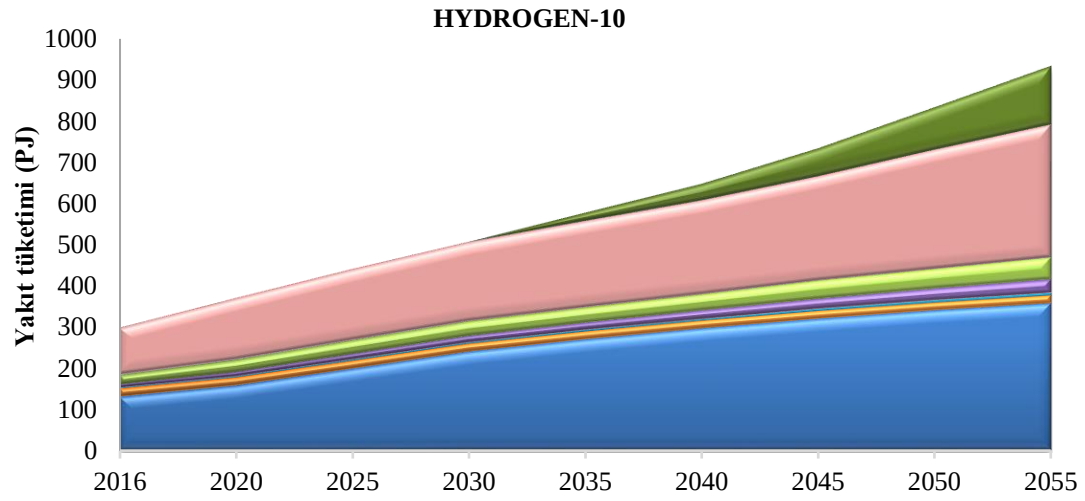
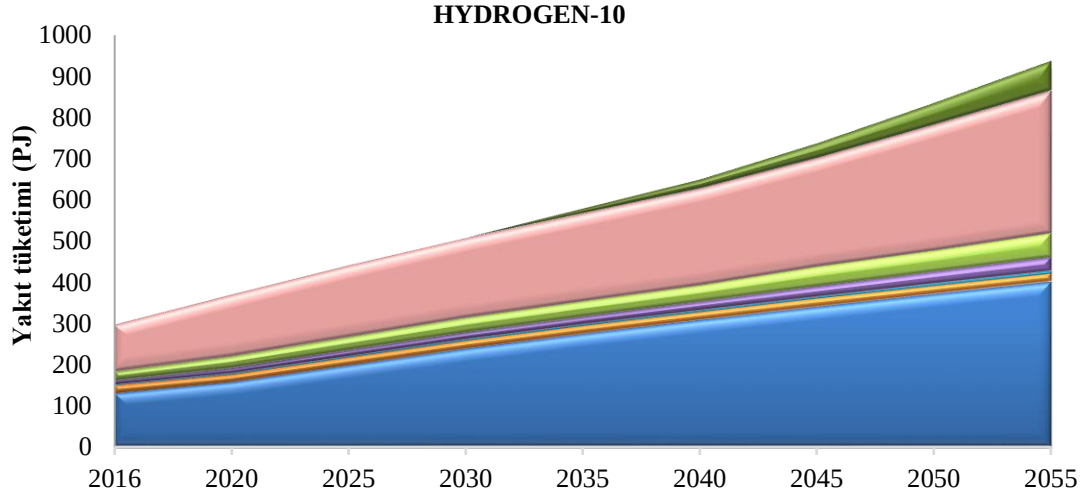
HYDROGEN-10	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	183	212	237	264	294	340	397	457
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	242	278	313	349	384
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20
HYDROGEN-20	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	183	212	237	264	293	338	397	456
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	242	278	313	349	384
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20
HYDROGEN-30	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	183	212	237	263	292	336	396	455
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	242	278	313	349	384
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Yakıt türü bazında tüketimlerde meydana gelen değişim daha net anlaşılabilmektedir (Şekil 8.9). Genel olarak üç senaryoda da hidrojen yakıtlı araç teknolojilerinin kullanıldığı 2035 yılından itibaren hidrojen tüketimi artmaya başlamış olup, dizel, benzin ve jet yakıtı tüketimi azalmıştır. HYDROGEN-10 senaryosunda 2055 yılında baz senaryoya kıyasla yakıt tüketimindeki azalmalar jet yakıtı, benzin, dizel, CNG ve LPG için sırasıyla %9,4, %8,4, %6,2, %1,9 ve %0,3 şeklindedir. Aynı değerler HYDROGEN-20 senaryosu için %19,4, %16,8, %12,5, %3,8 ve %0,7 iken HYDROGEN-30 senaryosu için %29,4, %25,2, %18,7, %5,8 ve %1'dir

Elektrik ve hibrit araç tercih edilmeyişinin sebebi ise, baz senaryo koşullarında sadece hidrojen yakıtlı araçların etkisinin incelenmesi amacıyla bu teknolojilerinin senaryolara dahil edilmemesidir.

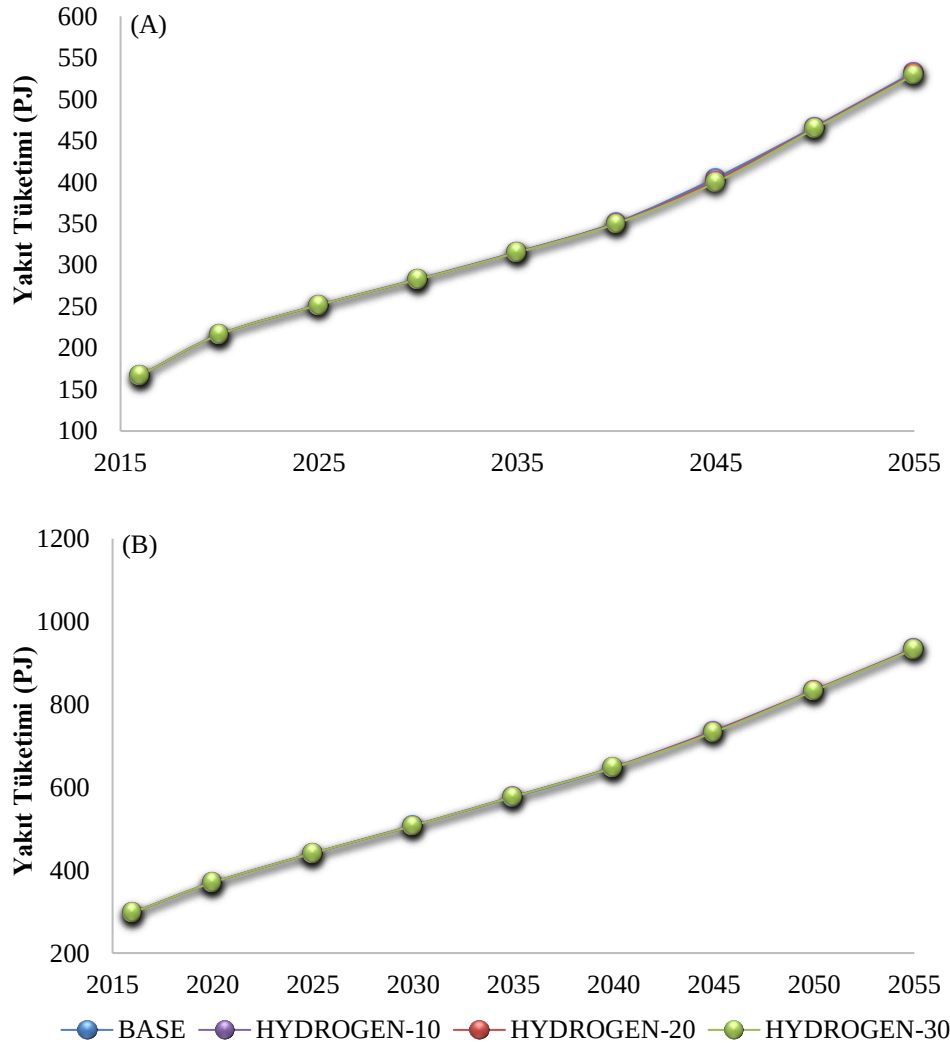


Şekil 8.9 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları yakıt türüne göre tüketimler.



Şekil 8.10 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları yakıt türüne göre tüketimler, UA dahil.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda da (Şekil 8.10) genel olarak üç senaryoda hidrojen yakıtlı araç teknolojilerinin kullanıldığı 2035 yılından itibaren hidrojen tüketimi artmaya başlamış olup, dizel, benzin ve jet yakıtı tüketimi azalmıştır. Uluslararası havayolu ulaşım talebinin de bu sonuçlara dahil olması sebebiyle hidrojen tüketimindeki artış daha net görülebilmektedir. HYDROGEN-10 senaryosunda 2055 yılında baz senaryoya kıyasla yakıt tüketimindeki azalmalar jet yakıtı, benzin, dizel, CNG ve LPG için sırasıyla %9,4, %8,4, %6,2, %1,9 ve %0,3 şeklindedir. Aynı değerler HYDROGEN-20 senaryosu için %19,5, %16,8, %12,4, %3,8 ve %0,7 iken HYDROGEN-30 senaryosu için %29,45 %25,2, %18,6, %5,8 ve %1'dir.



Şekil 8.11 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları yakıt tüketimi azaltımları
(A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

Öte yandan, Şekil 8.11'te görüldüğü gibi her üç senaryoda da azaltım oranları oldukça düşük olup, bu değerler her üç senaryoda da %1'in altındadır. Senaryolarda hidrojen

tüketimi artmış olsa bile toplam içerisinde dahil edildiğinde toplam üzerinde etki yaratmamaktadır.

Öte yandan, elektrik ve hidrojen tüketimi toplam tüketime dahil edilmeyince elde edilen azaltım oranları; uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımı dahil edilmediğinde HYDROGEN-10, HYDROGEN-20 ve HYDROGEN-30 senaryoları için sırasıyla %6,4, %12,8 ve %19,3'tür. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiğinde ise HYDROGEN-10, HYDROGEN-20 ve HYDROGEN-30 senaryoları için bu oranlar sırasıyla %7,5, %15,3 ve %23,1 olarak elde edilmiştir.

8.2.6 Toplu önlem senaryosu

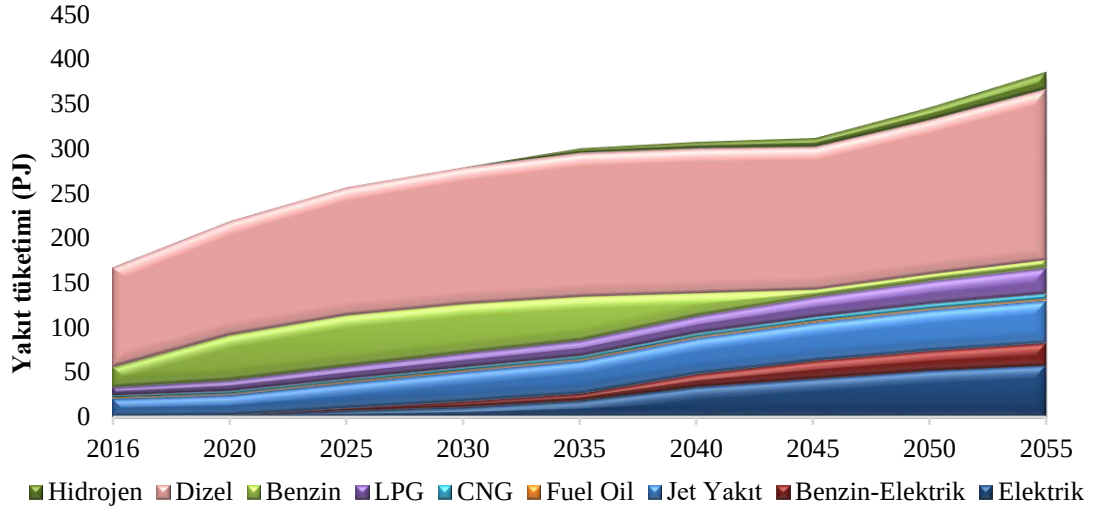
Toplu önlem senaryolarında birden fazla azaltım önlemi aynı anda ele alındığından azaltım oranlarının diğer senaryolara oranla yüksek olması beklenmektedir. Çizelge 8.6'de verilen alt kategori bazında yakıt tüketimi sonuçları incelendiğinde 2055 yılında %34 azalma ile en büyük değişiklik karayolunda gerçekleşmiştir.

Çizelge 8.6 : Toplu önlem senaryosu yakıt tüketimleri, PJ/yıl.

Alt kategori	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	185	211	225	239	240	239	267	301
Demiryolu	1,2	2,0	7,3	9,1	10,2	10,7	11,2	11,6	12,0
Denizyolu	9,1	9,0	10,3	11,3	11,9	12,4	13,0	13,5	14,0
Havayolu-UA	110	134	170	205	242	278	313	349	384
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20

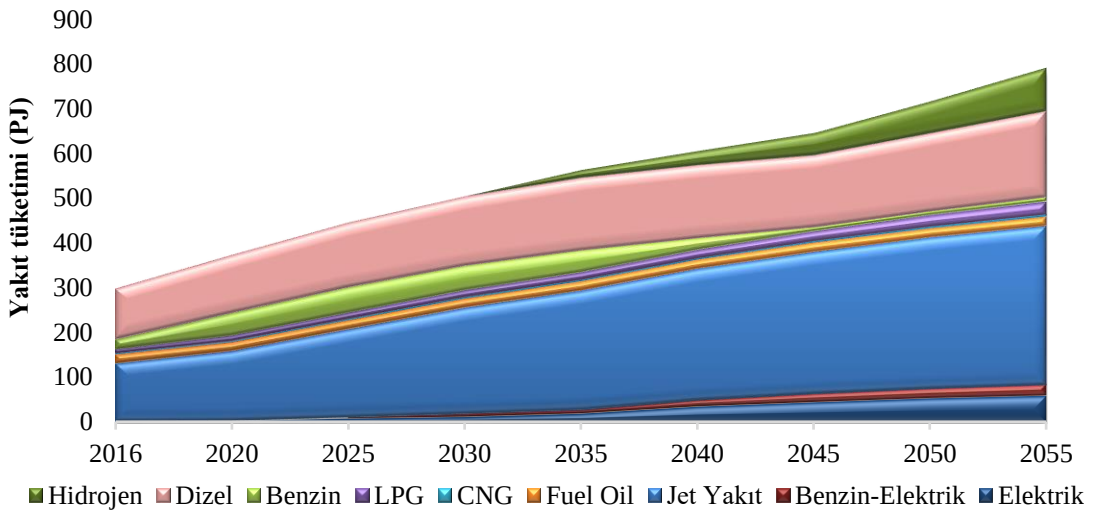
Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durum için Şekil 8.12'de yakıt türü bazında tüketimlerde meydana gelen değişim ayrıntılı olarak incelenebilmektedir. Dizel ve benzinli araç satışının yasaklandığı 2030 yılı elektrik ve hibrit araçların artışı, hidrojen yakıtlı teknolojilerin devreye girdiği 2035 yılı hidrojen yakıt tüketiminin başlaması açısından kritiktir. Ayrıca, dizel ve benzin yakıtlı otomobillerin 2030 yılında satışının yasaklanması ile trafikte olmaya devam eden mevcut otomobiller 2045 yılında artık tükenmiştir. Baz senaryo ile karşılaştırıldığında 2055 yılında benzin tüketiminde %85, dizel tüketiminde ise %48 azalma olmuştur. Dizel tüketimi azaltımının daha düşük olmasının sebebi, otomobil dışında diğer hafif araç türlerinde ve ağır vasıtalarda kullanımının devam edecek olmasıdır. Jet yakıtı, CNG ve LPG için azaltım oranları sırasıyla %19, %16 ve % 14 olup, elektrik tüketimi

yaklaşık 28 kat artış göstermiştir. Baz senaryoda hidrojen tüketimi olmayıp, toplu önlem senaryosunda uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda 19,2 PJ'a yükselmiştir.

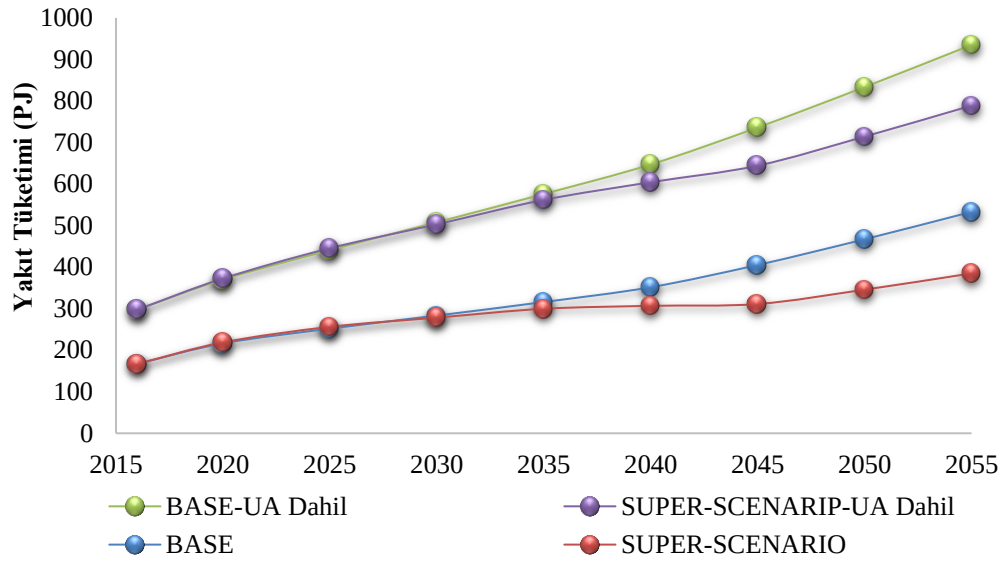


Şekil 8.12 : Toplu önlem senaryosu yakıt türüne göre tüketimler.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımı dahil edildiğinde hidrojen yakıtlı uçaklar sebebiyle 76,4 PJ daha hidrojen tüketimi olmuştur (Şekil 8.13). Uluslararası havayolu da dikkate alındığında baz senaryo sonuçlarında dizel ve jet yakıtı tüketimi birbirine yakın iken toplu önlem senaryosunda jet yakıtı tüketimi dizel tüketiminin 1,8 katıdır. Bu durumun sebebi, alınan önlemlerin daha çok karayolu ulaşımında uygulanacak olmasıdır. Hidrojen yakıtlı uçaklar 2035 yılı itibariyle devreye girse de çok sınırlı olmaktadır.



Şekil 8.13 : Toplu önlem senaryosu yakıt türüne göre tüketimler, UA dahil.



Şekil 8.14 : Toplu önlem senaryosu yakıt tüketimi azaltımları.

Şekil 8.14’de görüldüğü gibi toplu önlem senaryosunda toplam yakıt tüketimi azaltımı 2055 yılında yaklaşık %28’dir. Öte yandan, elektrik ve hidrojen tüketimi toplam tüketime dahil edilmeyince yakıt tüketimi azaltım oranı %42 olarak elde edilmiştir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda baz senaryoya göre yakıt tüketimlerindeki azaltım 2055 yılında %15,6’dır. Öte yandan, elektrik ve hidrojen tüketimi toplam tüketime dahil edilmeyince yakıt tüketimi azaltım oranı yaklaşık %32 olarak elde edilmiştir.

8.2.3 Elektrikli ve hibrit araç senaryoları

Elektrikli araç senaryoları orta, yüksek ve çok yüksek büyüme göz önüne alınarak oluşturulan elektrikli ve hibrit otomobil senaryolarını, dizel ve benzinli araçların satışının 2030 yılı itibarıyla yasaklandığı senaryoyu ve raylı ulaşımın etkisinin incelendiği senaryoyu içermektedir. Elektrikli ve hibrit araç senaryolarının yakıt tüketimi sonuçları Çizelge 8.7 ile Şekil 8.15-Şekil 8.17’de verilmiştir.

Çizelge 8.7 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt tüketimleri, PJ/yıl.

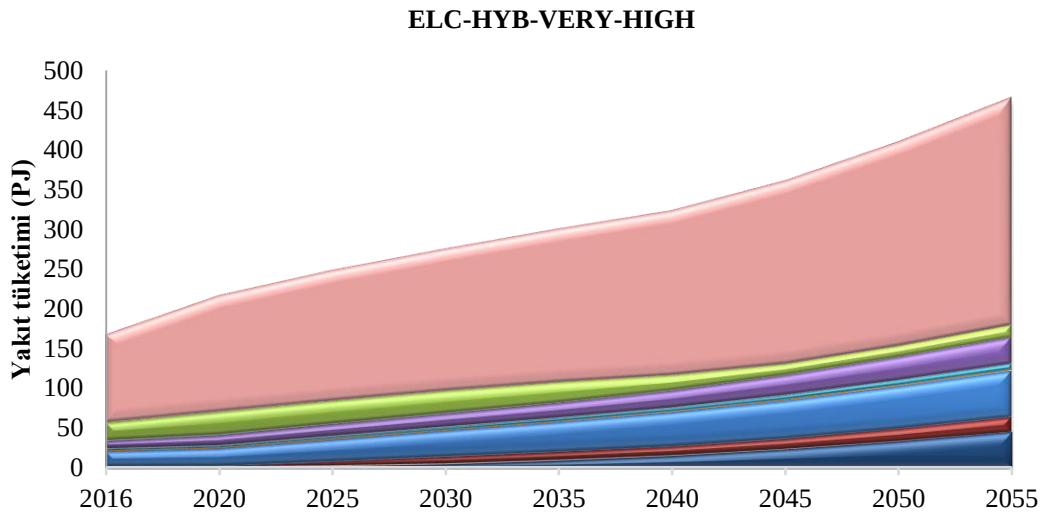
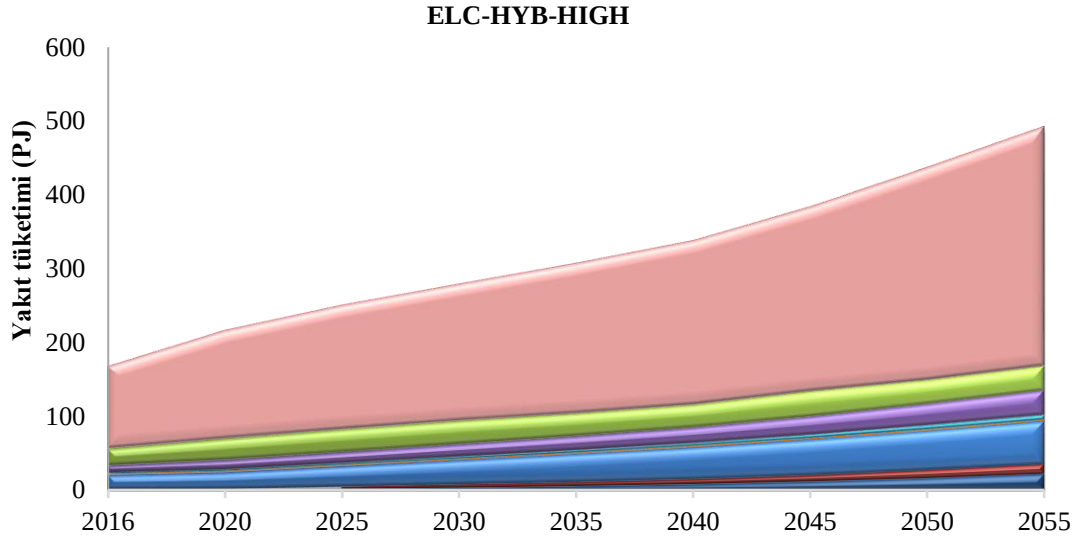
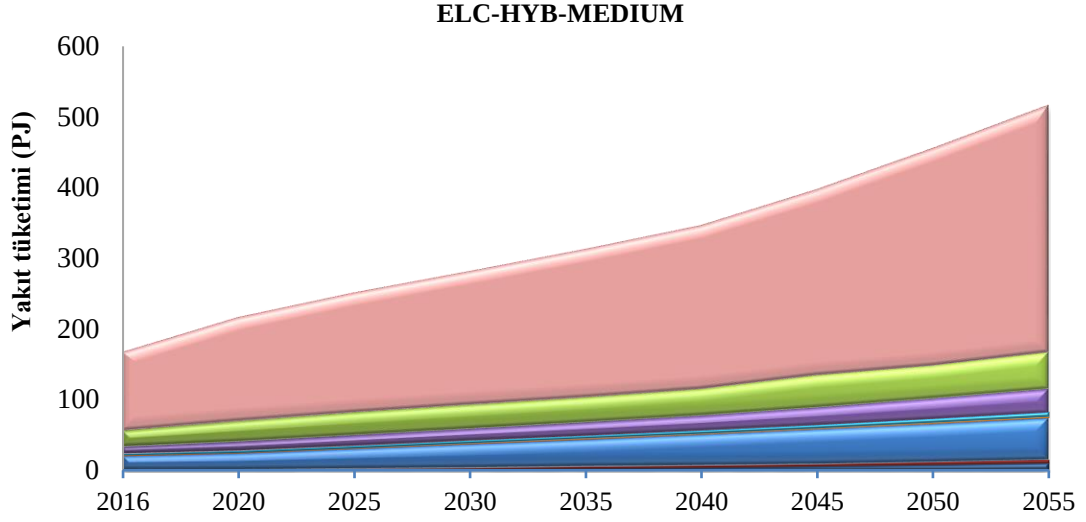
ELC_HYB_MEDIUM	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	183	212	236	261	289	334	386	442
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	240	276	311	347	382
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20
ELC_HYB_HIGH	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	183	211	233	256	281	321	369	418
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	240	276	311	347	382
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20
ELC_HYB_VERY-HIGH	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	183	209	229	249	266	298	341	391
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	240	276	311	347	382
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20
FOSSIL_BAN	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	183	212	234	260	284	292	333	378
Demiryolu	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1
Denizyolu	9,1	9,0	10,4	11,5	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
Havayolu-UA	110	134	170	205	240	276	311	347	382
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20
ELC_RAILWAY	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	20	23	28	33	38	43	48	53	58
Karayolu	137	183	212	237	264	294	342	398	458
Demiryolu	1,2	2,0	7,3	9,1	10,2	10,7	11,2	11,6	12,0
Denizyolu	9,1	9,0	10,3	11,3	11,9	12,4	13,0	13,5	14,0
Havayolu-UA	110	134	170	205	240	276	311	347	382
Denizyolu-UA	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda alt kategori bazında yakıt tüketimlerine bakıldığında, ilk üç senaryoda elektrikli ve hibrit otomobiller ele alındığından karayolu ulaşımı kaynaklı yakıt tüketimi değerleri etkilenmiştir. Dizel ve benzinli otomobillerin satışının yasaklandığı dördüncü senaryoda da yine karayolu kaynaklı tüketimlerde değişiklik olmuştur. Öte yandan,

demiryolu ulaşım ağının büyümesini ele alan son senaryoda, karayolu alt kategorisine ek olarak demiryolu elektrik tüketiminde 2055 yılında baz senaryoya göre yaklaşık 6 kat artış olmuştur. Ancak, karayolu yakıt tüketiminde sadece %0,1 oranında bir düşüş olmuştur.

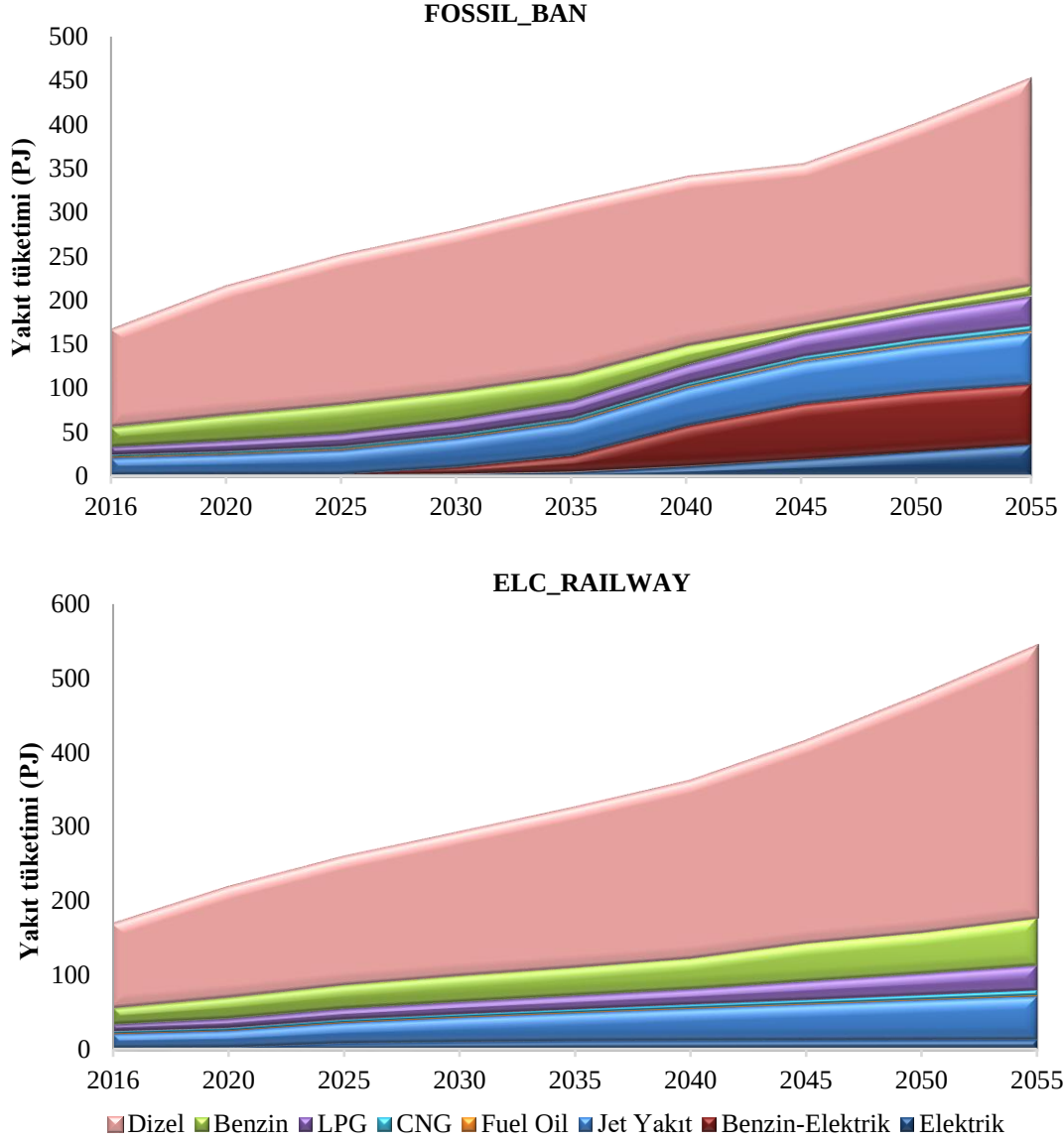
Şekil 8.15’da yakıt tüketimlerinde meydana gelen değişim görülmektedir. Orta büyüme senaryosunun ele alındığı ELC-HYB-MEDIUM senaryosunda elektrikli ve hibrit otomobillerin toplam yakıt tüketimi 2055 yılında yaklaşık 13 PJ olmuştur. Bu değer, ELC-HYB-HIGH ve ELC-HYB-VERY-HIGH senaryoları için sırasıyla 32,5 PJ ve 61,2 PJ’dir. Bu duruma paralel olarak bu senaryolarda benzin ve dizel tüketimi azalmıştır. FOSSIL-BAN senaryosunda 2055 yılı dizel ve benzin tüketimi baz senaryoya oranla yaklaşık %30 azalmış, elektrik ve hibrit araç tüketimi ise 102 PJ artış göstermiştir. Elektrikli ve hibrit araç teknolojileri fosil yakıtlı araç teknolojilerine göre çok daha verimli olmaları sebebiyle aynı talebi daha az yakıt tüketimi ile karşılayabilmektedir.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda alt kategori bazında yakıt tüketimlerine bakıldığında, havayolu ve denizyolu yakıt tüketimlerinde meydana gelen artış dışında önemli bir değişiklik olmamıştır. Elektrikli ve hibrit araç senaryoları ile fosil yakıtlı araç satışlarının yasaklandığı senaryolar otomobiller üzerinde değişiklik yarattığı için karayolu sonuçlarını etkilemektedir. Öte yandan, raylı ulaşım senaryosunda toplu ulaşımın etkilenmesi sebebiyle demiryolunun yanı sıra karayolu ve denizyolu ulaşımına ait yakıt tüketimlerinde değişiklik olmuştur.



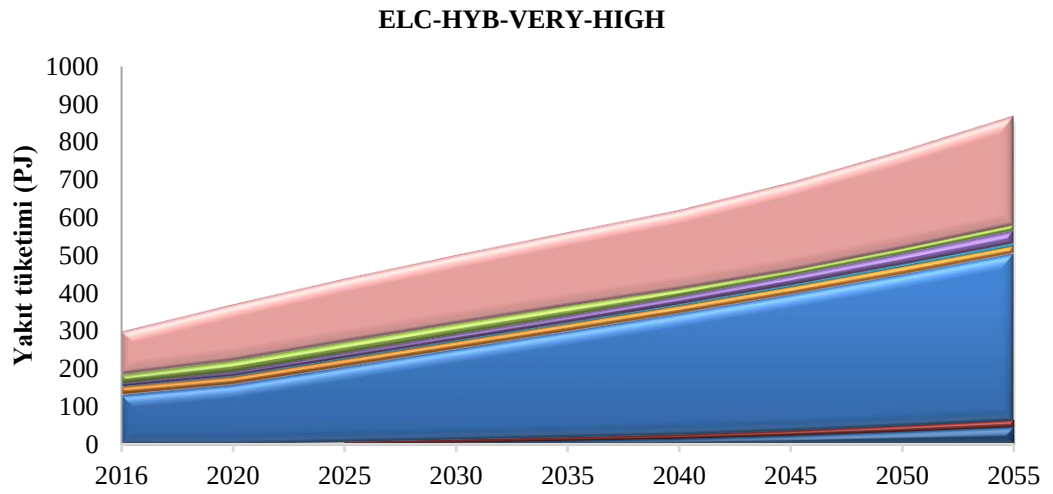
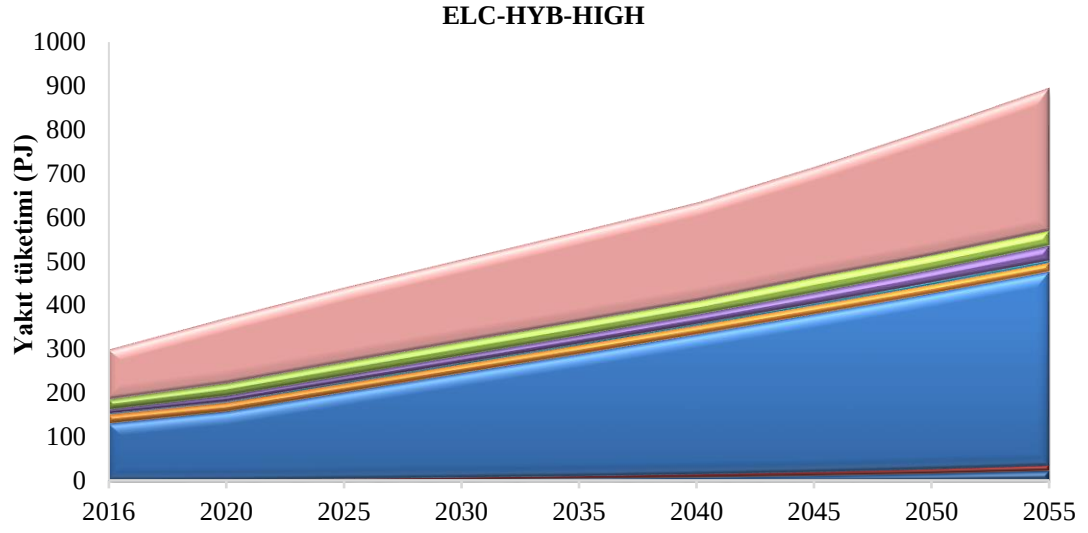
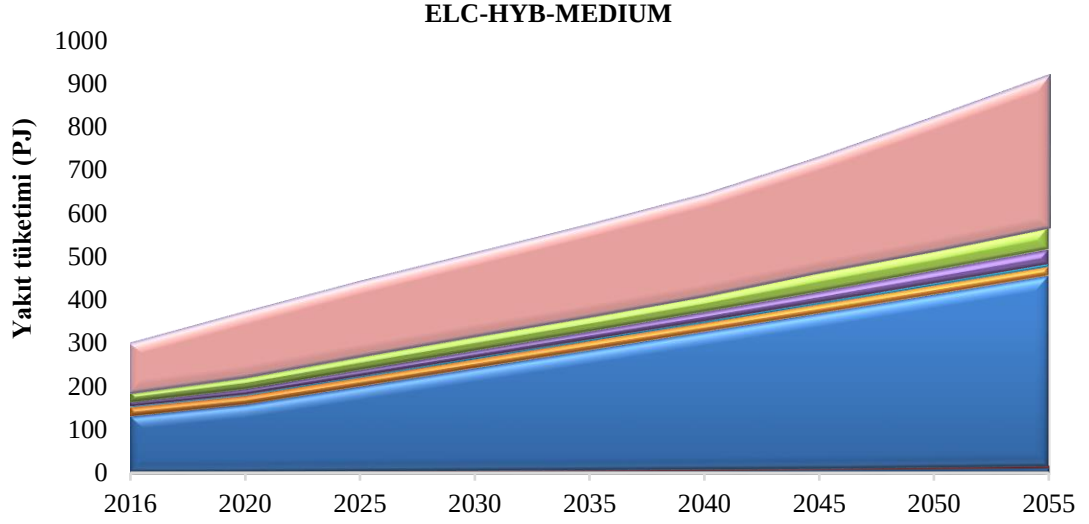
■ Elektrik ■ Benzin-Elektrik ■ Jet Yakıt ■ Fuel Oil ■ CNG ■ LPG ■ Benzin ■ Dizel

Şekil 8.15 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt türüne göre tüketimler.



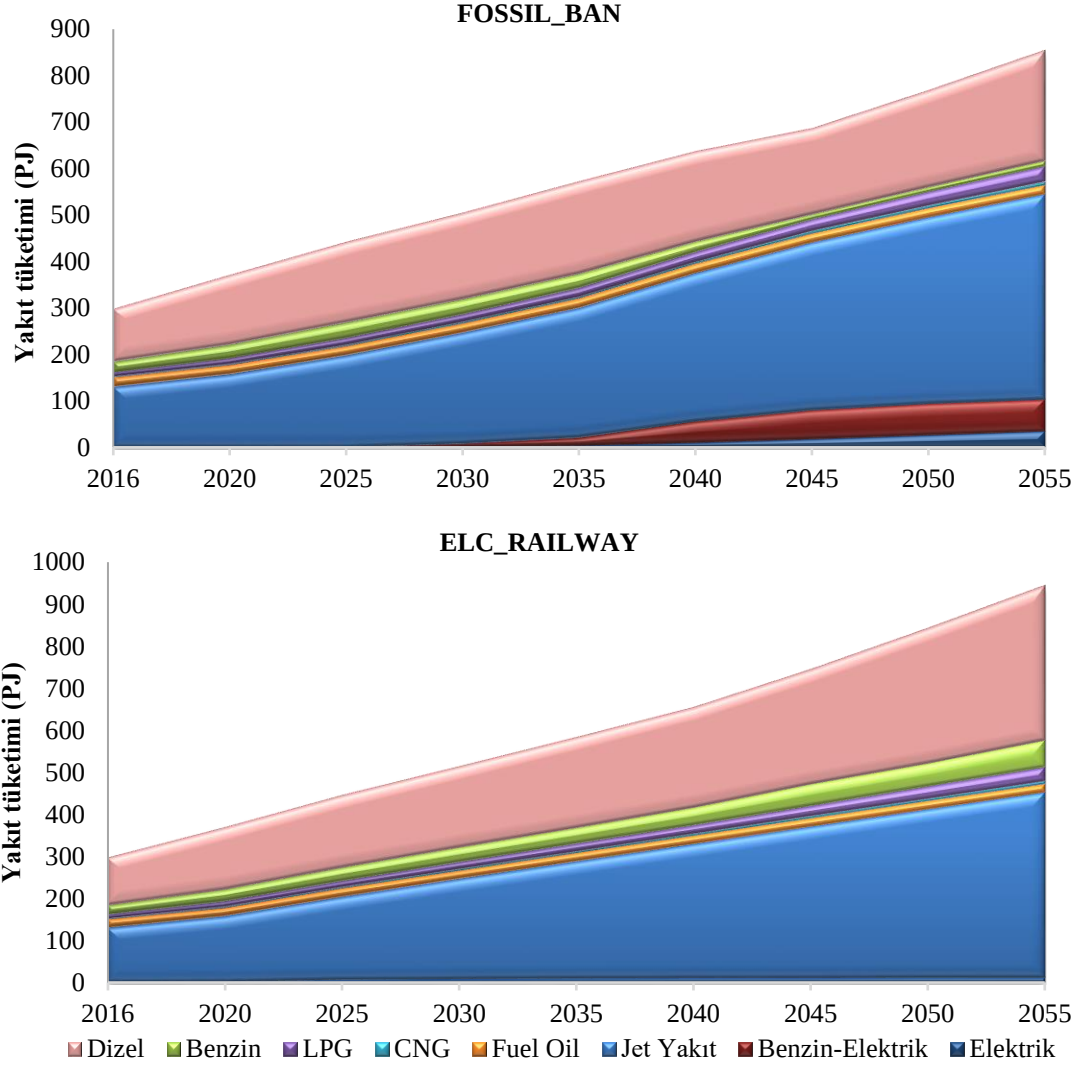
Şekil 8.6 (devam): Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt türüne göre tüketimler.

Şekil 8.16, uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımı sonuçlarını içeren yakıt tüketimi değişimlerini göstermekte olup, Şekil 8.15'dan farklı olarak uluslararası havayolu ulaşımı sebebiyle jet yakıtı tüm senaryolarda yakıt tüketiminin yaklaşık yarısını oluşturmaktadır.



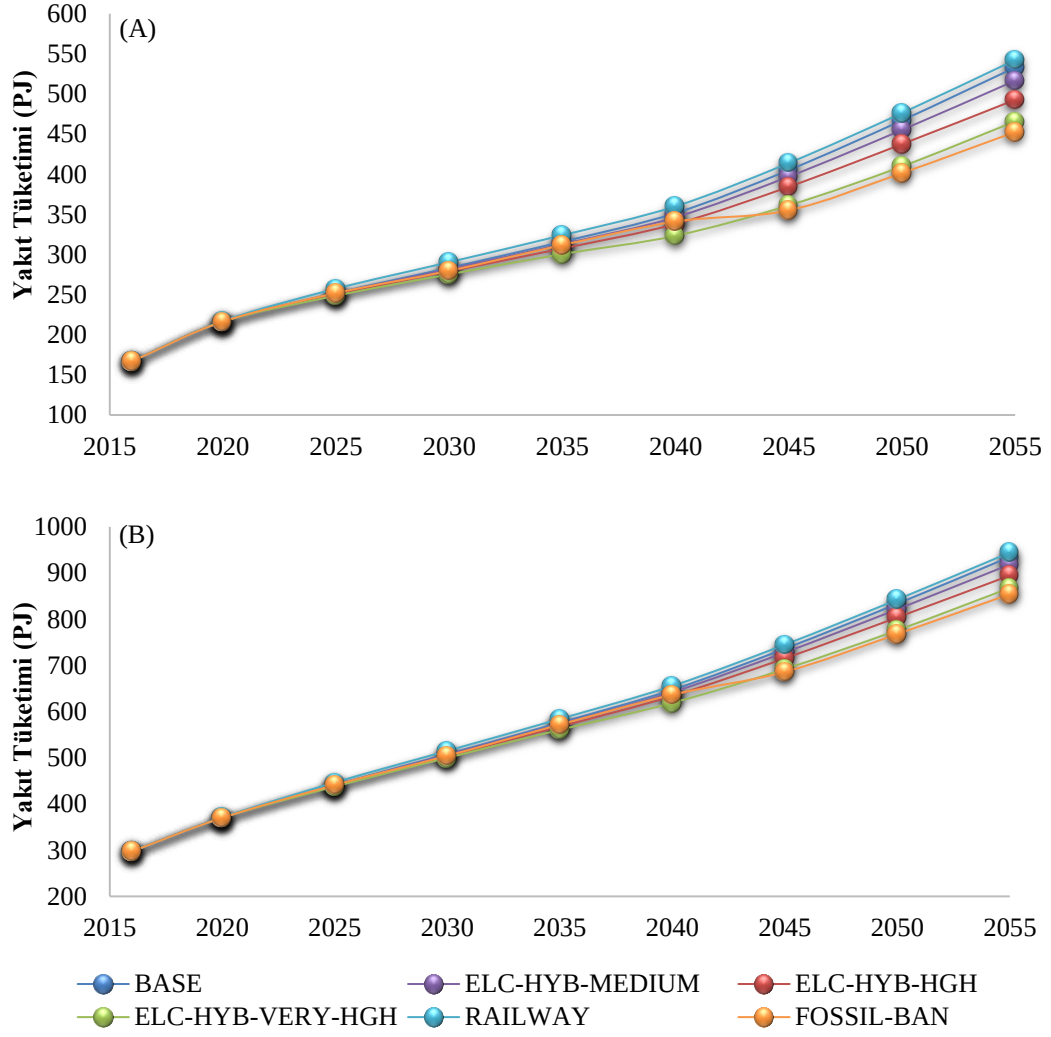
■ Elektrik ■ Benzin-Elektrik ■ Jet Yakıt ■ Fuel Oil ■ CNG ■ LPG ■ Benzin ■ Dizel

Şekil 8.16 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt türüne göre tüketimler, UA dahil.



Şekil 8.7 (devam): Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt türüne göre tüketimler, UA dahil.

Baz senaryoya göre yakıt tüketimindeki azaltım Şekil 8.17’de ele alınmıştır. Elektrik tüketimleri de toplam yakıt tüketimi içerisine dahil edildiğinde ELC-HYB-MEDIUM, ELC-HYB-HIGH, ELC-HYB-VERY-HIGH ve FOSSIL-BAN senaryolarında yakıt tüketiminde sırasıyla %3,1, %7,6, %12,6 ve %15,1 azaltım olurken ELC_RAILWAY senaryosunda %1,8 oranında bir artış gerçekleşmiştir. Demiryolu ağının uzaması sonucu karayolu ve denizyolu toplu ulaşımından demiryoluna geçen yolcu sayısı fosil yakıt tüketiminde az miktarda düşüşe sebep olmuştur, ancak demiryolu elektrik tüketimi 6 kat artış göstermiştir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımı sonuçlarını da içeren yakıt tüketimi azaltım oranları ELC-HYB-MEDIUM, ELC-HYB-HIGH, ELC-HYB-VERY-HIGH ve FOSSIL-BAN senaryoları için sırasıyla sırasıyla %1,7, %4,3, %7,2 ve %8,6’dır. ELC_RAILWAY senaryosunda ise %1 oranında bir artış gerçekleşmiştir.



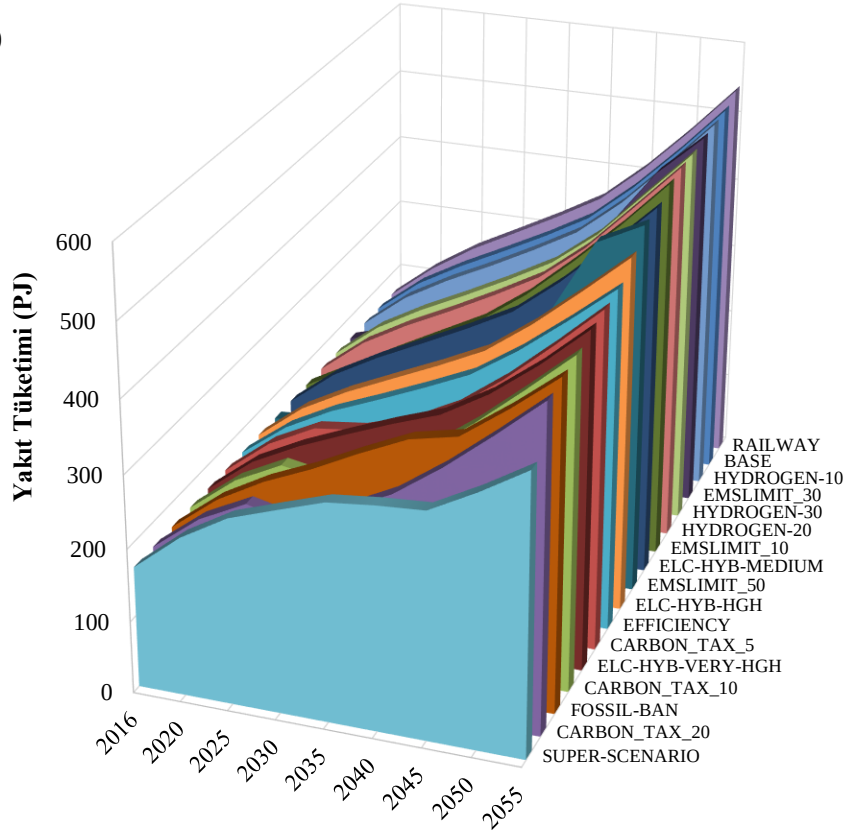
Şekil 8.17 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt tüketimi azaltımları
(A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

8.2.7 Yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması

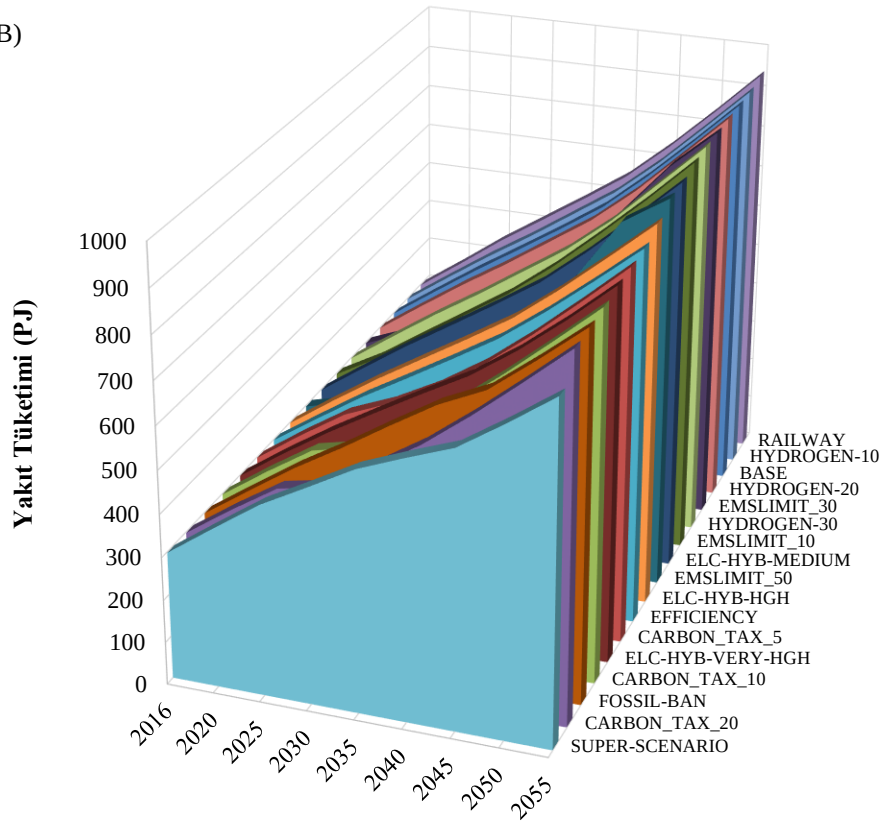
Yakıt tüketimine ilişkin değerlendirmeler daha anlaşılabilir olması açısından senaryo grupları şeklinde yapılmıştır. Tüm senaryoların toplu olarak yakıt tüketimlerine ilişkin sonuçlar Şekil 8.18’de gösterilmiştir. Bu kapsamda, toplu önlem senaryosundan sonra karbon vergisi uygulanmasının, fosil yakıtlı araç satışının yasaklanmasının ve elektrikli-hibrit otomobil kullanımının yaygınlaştırılmasının etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Alternatif senaryolar sea gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik uygulamaları değerlendirmektedir. Elektrik ve hidrojen tüketimleri de yakıt tüketimine dahil edildiğinden önemli olan toplam yakıt tüketiminde meydana gelen azaltımdan öte fosil yakıt tüketiminde meydana gelen azaltımdır.

(A)



(B)

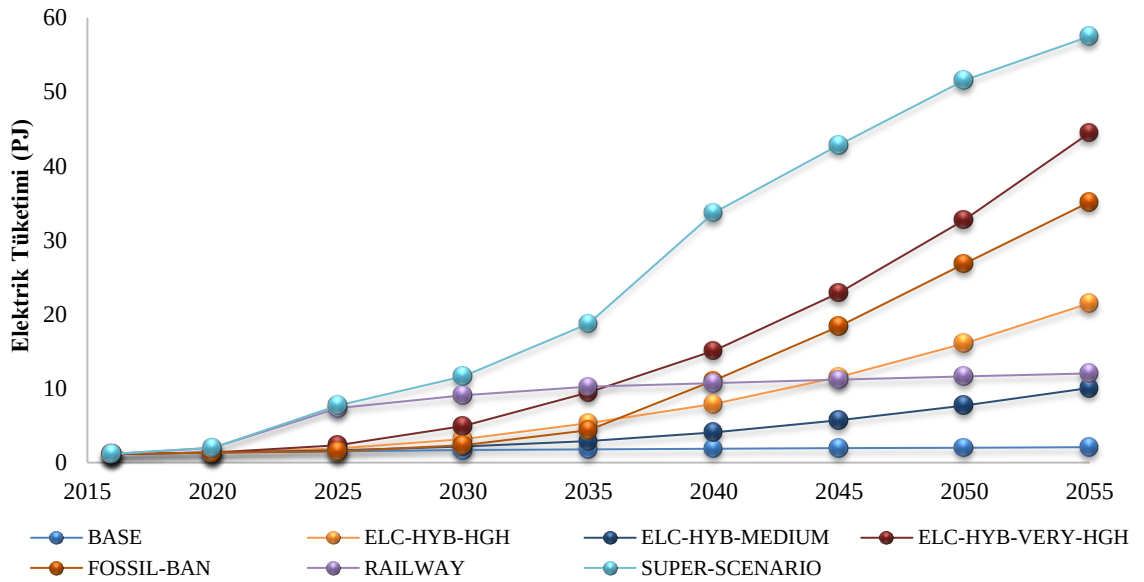


Şekil 8.18 : Yakıt tüketimlerinin toplu karşılaştırması (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

8.2.8 Senaryoların elektrik tüketimleri

Elektrikli araçlar son yıllarda giderek popüler hale gelmektedir. Elektrikli araçların emisyonu sebep olmadığı kanısı yaygın olup, bu durum depodan tekere kadar olan süreçte geçerlidir. Oysa elektrik üretim aşamasında yoğun sera gazı emisyonu olmakta, bu miktar kullanılan yenilenebilir enerji miktarına göre değişmektedir. Yapılan çalışmada, elektrik üretimi kaynaklı sera gazı emisyonları da ayrı olarak hesaplanması amaçlanmıştır.

Bu kapsamda, elektrik tüketimini içeren senaryolara ilişkin sonuçlar Şekil 8.19’da verilmektedir. Diğer senaryolarda da özellikle raylı ulaşımdan kaynaklı elektrik tüketimi olmaktadır; ancak, emisyon azaltımının elektrikli araçların kullanılması yoluyla sağlanmasının hedeflendiği bu senaryolar detaylı ele alınmıştır.



Şekil 8.19 : Elektrikli araç senaryoları elektrik tüketimleri.

Toplu önlem senaryosunda 2055 yılı elektrik tüketimi 57 PJ, çok yüksek büyüme durumunu esas alan elektrikli ve hibrit araç senaryosunda 44 PJ ve fosil yakıtlı araçların satışının yasaklandığı senaryoda ise 35 PJ olmuştur. Baz senaryo için bu değer yalnızca 2,1 PJ’dir.

8.3 Sera Gazı Emisyonu

Sera gazı emisyonu sonuçları uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği (UA Dahil) ve dahil edilmediği (UA dahil değil) durumlar için ayrı ayrı

değerlendirilmiş olup, detaylar aşağıda yer almaktadır. Araç türüne göre detaylı sera gazı emisyon sonuçları ise EK C’de verilmektedir.

8.3.1 Baz Senaryo

Baz senaryo için sera gazı salımlarına ilişkin sonuçlar Çizelge 8.8 ve Şekil 8.20’de verilmiştir. 2016 yılında toplamda 12,3 Mton CO₂e olan sera gazı emisyon miktarı yakıt tüketimi sonuçları ile paralel olarak 2055 yılında 3,2 kat artış sonucu 39,3 Mton CO₂e’ye yükselmiştir. Bu değerler uluslararası denizyolu ve havayolu taşımacılığının modele dahil edilmediği durum için geçerlidir. Alt kategori bazında sera gazı emisyonu sonuçlarına göre karayolu kaynaklı SGE salımı 2016 yılında %83 ve 2055 yılında %87 ile en yüksek paya sahiptir. İkinci sırada gelen havayolunun sektör kaynaklı toplam emisyonlar içerisindeki payı ise %11 olarak belirlenmiştir.

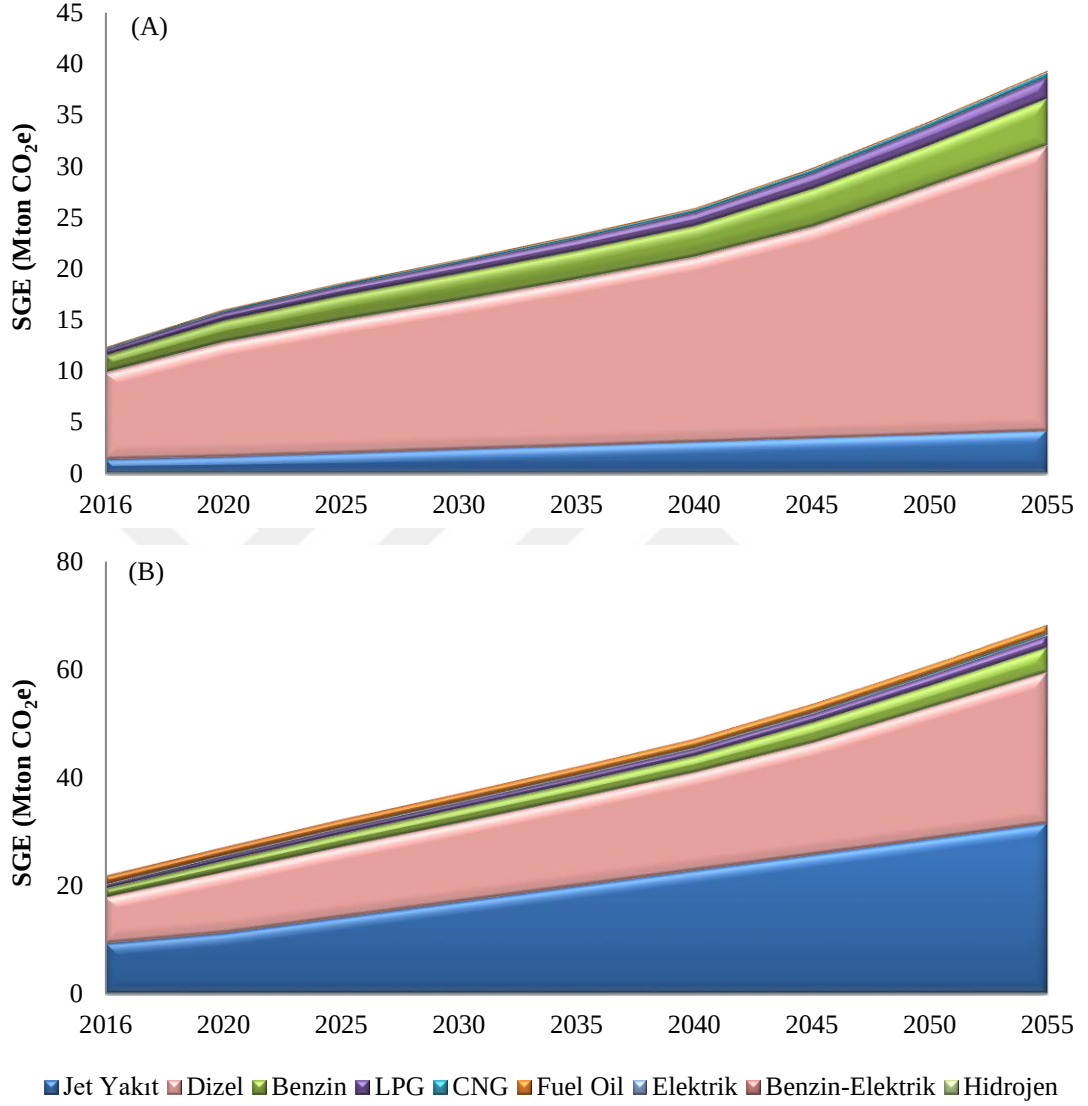
Uluslararası denizyolu ve havayolu taşımacılığının modele dahil edildiği durumda ise 2016 yılında toplamda 21,8 Mton CO₂e olan sera gazı emisyonu miktarı 2055 yılında 3,1 kat artış ile 68,2 Mton CO₂e’ye yükselmiştir. Alt kategori bazında sera gazı sonuçlarına göre, toplam emisyonun %47’si karayolu ulaşımından, %43’ü ise havayolu ulaşımından kaynaklanmaktadır. Uluslararası havayolu ulaşımı değerlendirmeye dahil edildiğinde karayolu ulaşımı ile yakın emisyon oranına sahip oldukları görülmektedir. Yine benzer şekilde uluslararası denizyolu taşımacılığı değerlendirmeye alındığında SGE oranının yaklaşık %10’a çıktığı görülmektedir.

Çizelge 8.8 : Baz senaryo alt kategoriye göre SGE miktarı, Mton CO₂e/yıl.

Alt kategori	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,2
Karayolu	10,2	13,6	15,8	17,6	19,6	21,8	25,4	29,5	34,0
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	17,2	19,8	22,3	24,9	27,4
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6

Uluslararası havayolu ulaşımı değerlendirmeye dahil edilmediğinde yakıt tüketimi ile uyumlu olarak emisyonların büyük çoğunluğu %68,5 ile dizel yakıtlardan kaynaklanmıştır. Bu değeri %13,5 ile benzin ve %11,4 ile jet yakıtı takip etmektedir. LPG, CNG ve Fuel-Oil kaynaklı emisyon oranları ise sırasıyla %4,8, %1 ve %0,8 olarak belirlenmiştir.

Toplam sera gazı emisyonunun %40'ını otomobiller oluşturmaktadır. Bu değeri %17 ile kamyonet, %12 ile otobüs ve %11 ile uçak takip etmektedir. Uluslararası uçuşların bu değerlendirmeye dahil olmaması sebebiyle uçaklara ait emisyon oranı düşük görünmektedir.



Şekil 8.20 : Baz senaryo yakıt türüne göre sera gazı emisyonları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

Uluslararası havayolu ulaşımı değerlendirmeye dahil edildiğinde 2016 yılında toplam sera gazı emisyonunun yaklaşık %39'unu oluşturan dizel emisyonları oranı 2055 yılında %41'e çıkmıştır. Öte yandan, benzin kaynaklı SGE oranı ise %7,6'dan %6,8'e gerilemiştir. 2016 yılında LPG, Fuel-Oil ve CNG kaynaklı emisyonlar toplam emisyon miktarının sırasıyla %2,7, %7,1 ve %0,5'ini oluşturmaktadır. Toplam sera gazı emisyonlarının %43'ünü uçaklar oluşturmaktadır. Bu değeri %22 ile otomobil, %10 ile gemi ve kamyonet ve %7 ile otobüs takip etmektedir.

8.3.2 Karbon vergisi senaryoları

Karbon vergisi senaryolarının sera gazı emisyon sonuçları Çizelge 8.9 ve Şekil 8.21-Şekil 8.23'te verilmiştir. Yakıt tüketimi sonuçları irdelenirken, karbon vergisi uygulamasının her üç senaryoda da karayolu ulaşımı kaynaklı tüketim üzerinde değişiklik yarattığı belirtilmişti. Buna paralel olarak sera gazı emisyonlarında da aynı şekilde bir değişiklik meydana gelmiştir.

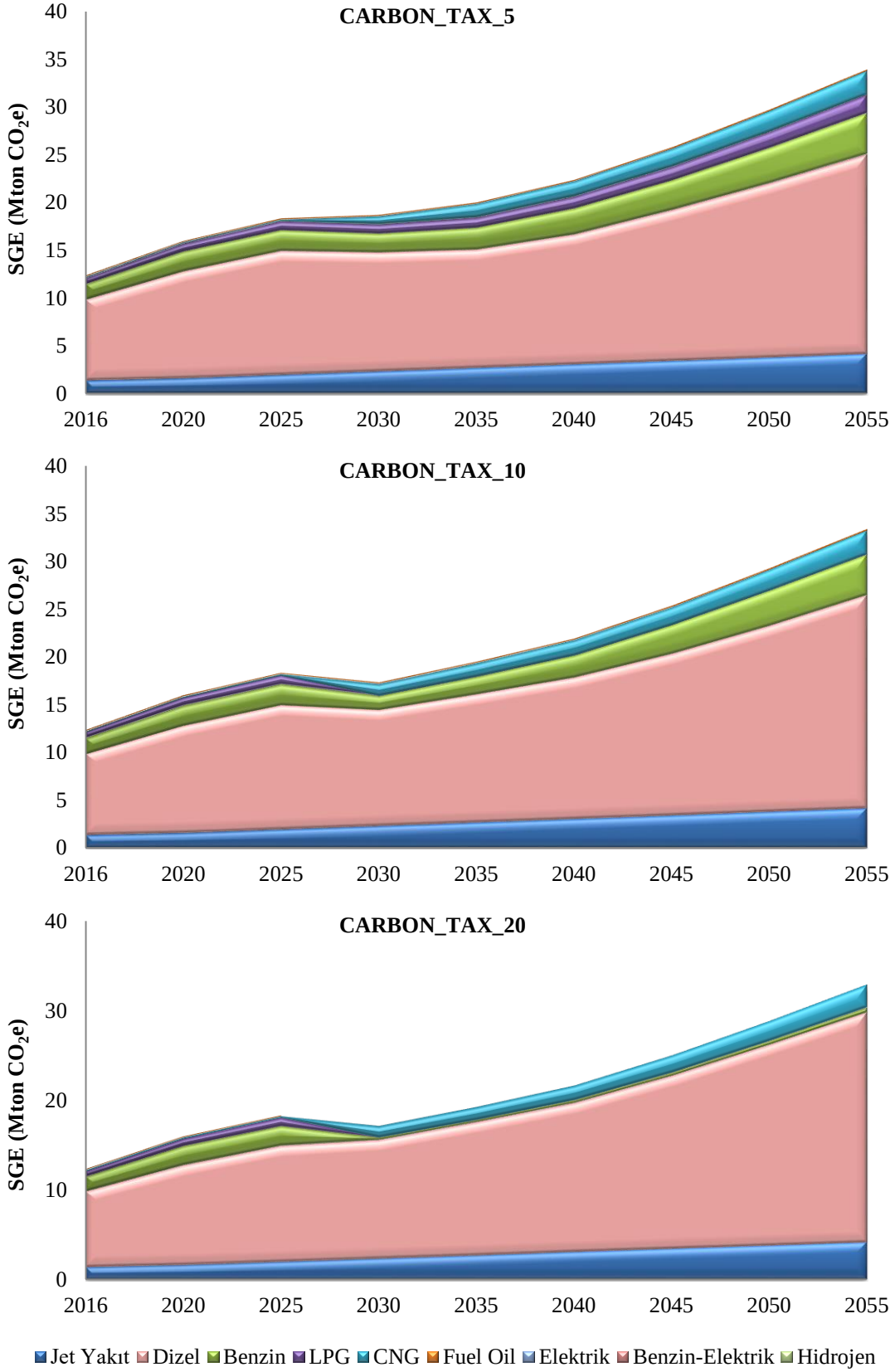
Çizelge 8.9 : Karbon vergisi senaryoları SGE miktarı, Mton CO₂e/yıl.

CARBON_TAX_5	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,2
Karayolu	10,2	13,6	15,5	15,5	16,4	18,3	21,3	24,9	28,7
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	17,2	19,8	22,3	24,9	27,4
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
CARBON_TAX_10	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,2
Karayolu	10,2	13,6	15,5	14,1	15,9	17,9	20,9	24,4	28,1
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	17,2	19,8	22,3	24,9	27,4
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
CARBON_TAX_20	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,2
Karayolu	10,2	13,6	15,5	13,9	15,6	17,6	20,5	24,0	27,6
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	17,2	19,8	22,3	24,9	27,4
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

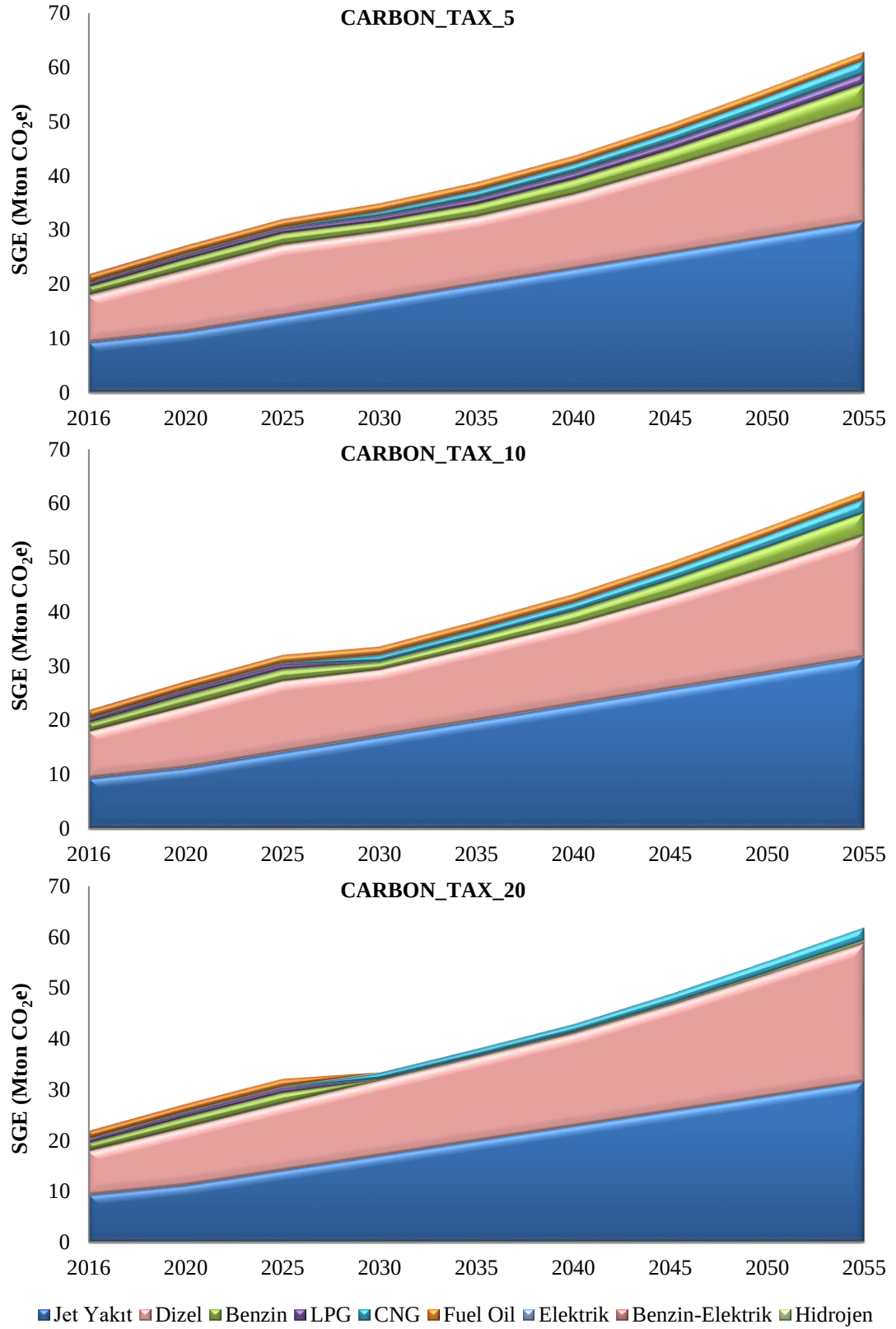
Genel olarak üç senaryoda da karbon vergisinin getirildiği 2030 yılında daha yüksek emisyon faktörüne sahip fosil yakıt kaynaklı emisyonlarda bir düşüş yaşanmıştır. Model maliyet optimizasyonu temeline dayanmaktadır. Bu çerçevede, 2055 yılında CARBON_TAX_20 senaryosunda optimum koşullar LPG ve benzinin azalıp, dizel ve CNG'nin artmasıyla yakalanmıştır. Burada karbon vergisine ek teknolojilerin ilk yatırım ve işletme maliyetleri de model tarafından göz önüne alınmaktadır.

Baz senaryo ile karşılaştırıldığında karbon vergisi getirildiğinde daha çok ağır vasıta araçların emisyon salımlarının azaldığı görülmektedir. CARBON_TAX_5 senaryosunda baz senaryoya oranla emisyon azaltım oranları Otobüs, Kamyon, Kamyonet ve Otomobil için sırasıyla %67, %66, %2 ve %1 olurken, karbon vergisi arttıkça CARBON_TAX_20 senaryosunda devreye denizyolu ulaşımı girmiş ve otomobil için oran %8'e çıkmıştır.

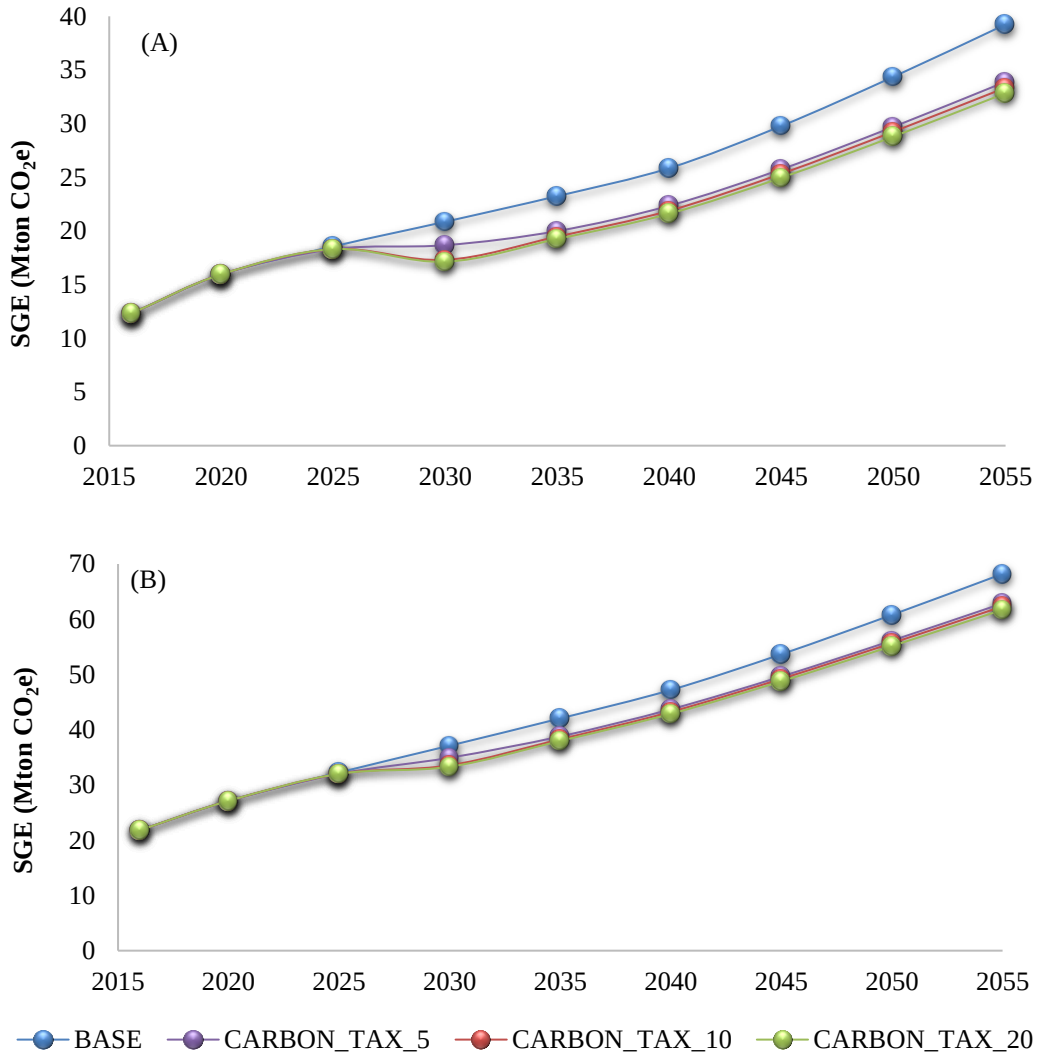




Şekil 8.21 : Karbon vergisi senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları.



Şekil 8.22 : Karbon vergisi senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.



Şekil 8.23 : Karbon vergisi senaryoları SGE azaltım oranları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

Baz senaryoya göre sera gazı emisyon salımlarındaki azaltım oranlarına göre, uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda ton başına 5\$, 10\$ ve 20\$ karbon vergisi getirildiğinde 2055 yılında baz senaryoya oranla sırasıyla %13,6, %15 ve %16,3 oranında emisyon azaltımı olmuştur. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda ise bu oranlar sırasıyla %7,8, %8,6 ve %9,5 olmuştur.

TIMES modelleme sisteminin kullanıldığı ve 2012-2052 yılları için Türkiye'nin Enerji Sistemi'nin incelendiği bir çalışmada, karbon vergisinin sera gazı emisyonları üzerinde meydana getireceği azaltım miktarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ton emisyon başına 10\$, 20\$ ve 30\$ karbon vergisi uygulaması senaryoları ele alınmış olup, tüm enerji sistemin için sırasıyla %22,5, %24 ve %27,4'lük sera gazı emisyon

potansiyeli öngörülmüştür. En yüksek azaltım toplamda %80'i oluşturacak şekilde elektrik üretim sektörü ve endüstri sektörlerinde görülmekte olup, ulaştırma sektörü kaynaklı sera gazı emisyon azaltım oranlarının bu çalışma kapsamında elde edilen azaltım oranları ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır (Kumbaroğlu ve diğ., 2017).

Karbon vergisi uygulayan ülkeler ile Türkiye'nin çevresel performansları ele alındığında, 2018 yılı çevresel performans endeksi verilerine göre ülkemiz yaklaşık 53 puan ile 180 ülke arasında 108. sırada yer almaktadır. Hindistan dışındaki karbon vergisi uygulayan ülkelerin 70-85 puan aralığı ile ilk 30 ülke içerisinde yer aldığı görülmektedir. Dolayısıyla karbon vergisi uygulamasının çevresel performans açısından önemli bir gösterge olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, alt başlıklar altında ele alındığında iklim ve enerji kategorisinde Türkiye yaklaşık 40 puanla 136. sırada yer almakta olup, karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik uygulamalara geçiş yapılması gerektiği değerlendirilmektedir (Balı ve Yaylı, 2019).

8.3.3 Elektrikli ve hibrit araç senaryoları

Elektrikli ve hibrit araç senaryolarının sera gazı emisyonu sonuçları Çizelge 8.10 ve Şekil 8.24-Şekil 8.26'da verilmiştir.

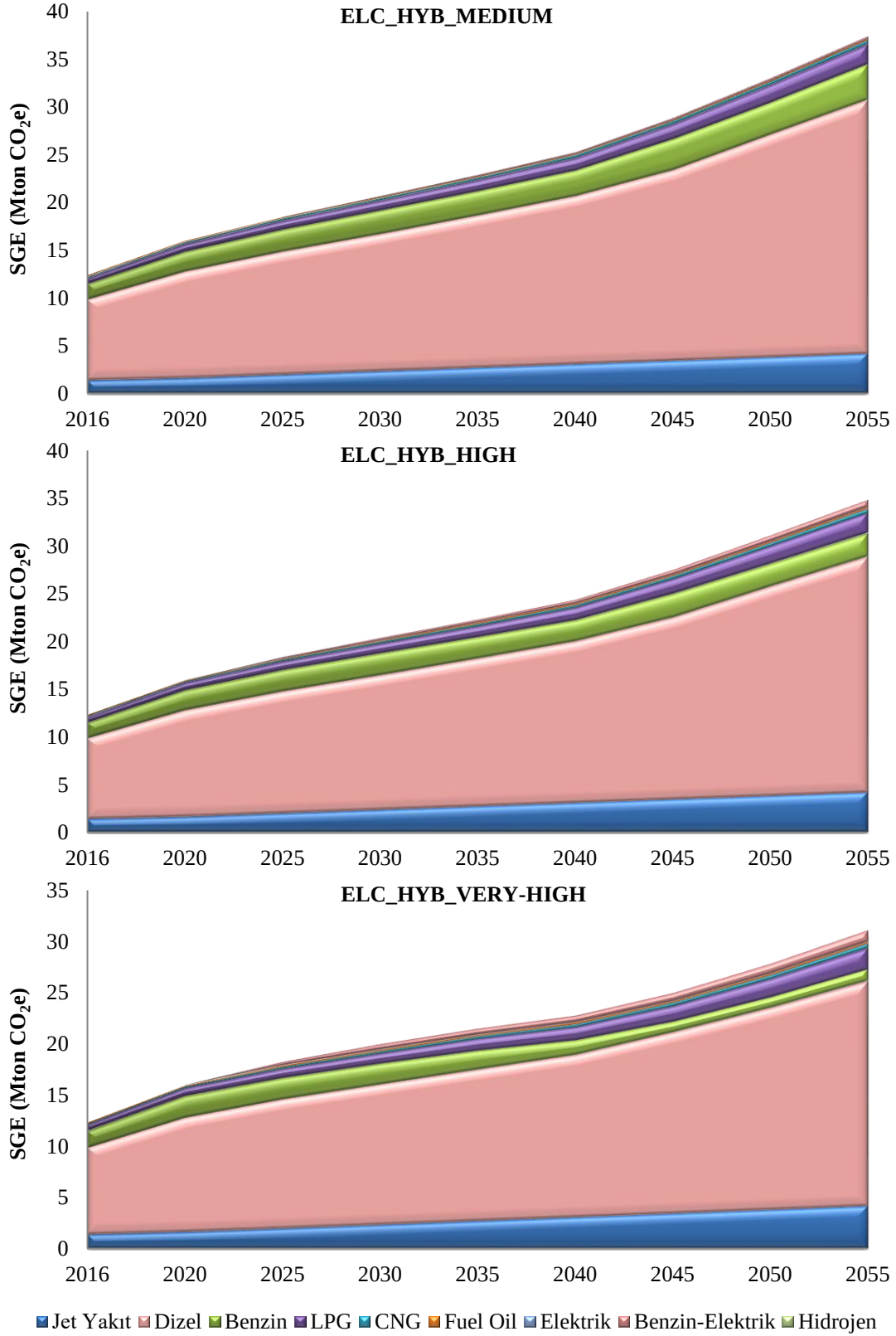
Çizelge 8.10 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları SGE miktarı, Mton CO₂e/yıl.

ELC_HYB_MEDIUM	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,2
Karayolu	10,2	13,6	15,7	17,5	19,3	21,3	24,4	28,2	32,2
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	17,2	19,8	22,3	24,9	27,4
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
ELC_HYB_HIGH	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,2
Karayolu	10,2	13,6	15,6	17,2	18,7	20,3	23,0	26,2	29,5
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	17,2	19,8	22,3	24,9	27,4
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
ELC_HYB_VERY-HIGH	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,2
Karayolu	10,2	13,6	15,4	16,7	17,8	18,7	20,5	22,9	25,8
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	17,2	19,8	22,3	24,9	27,4
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
FOSSIL_BAN	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,2
Karayolu	10,2	13,6	15,8	17,2	18,9	19,7	19,6	22,0	24,7
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	17,2	19,8	22,3	24,9	27,4
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
ELC_RAILWAY	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,2
Karayolu	10,2	13,6	15,8	17,6	19,6	21,8	25,3	29,5	34,0
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	17,2	19,8	22,3	24,9	27,4
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6

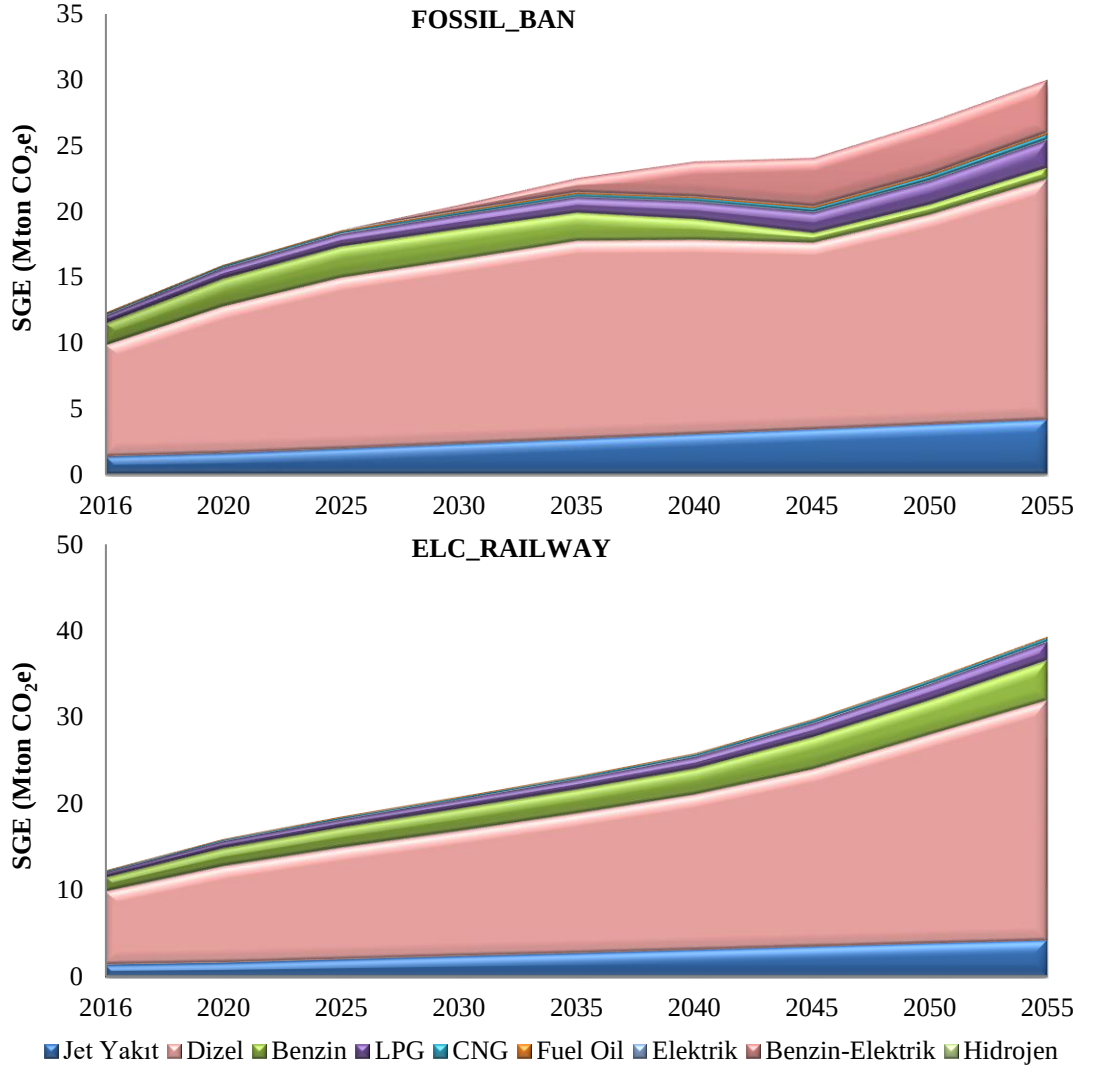
Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda alt kategori bazında sera gazı emisyon miktarlarına bakıldığında, ilk üç senaryoda elektrikli ve hibrit otomobiller ele alındığından karayolu ulaşımı kaynaklı sonuçlar etkilenmiştir.

Dizel ve benzinli otomobillerin satışının yasaklandığı dördüncü senaryoda da yine karayolu kaynaklı sera gazı emisyonlarında değişiklik olmuştur. Öte yandan, demiryolu ulaşım ağının büyümesini ele alan son senaryoda da karayolu alt kategorisinde değişiklik olmuştur. İstanbul raylı ulaşım sistemi elektrik tükettiği için elektrik tüketimi artmasına rağmen emisyon miktarı sıfır olarak görünmektedir. Elektrik üretimi kaynaklı emisyonlar ayrıca ilerleyen bölümlerde değerlendirilmiştir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda alt kategori bazında yakıt tüketimlerine bakıldığında farklı olarak havayolu ve denizyolu SGE miktarında artış olmuştur.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durum için orta büyüme senaryosunun ele alındığı ELC-HYB-MEDIUM senaryosunda elektrikli ve hibrit otomobillerin toplam devreye alınmasıyla benzin ve dizel tüketimi kaynaklı SGE miktarı 2055 yılında sırasıyla %19 ve %4,4 oranında azalmıştır. Bu azaltım oranları ELC-HYB-HIGH senaryosu için %47,5 ve %11, ELC-HYB-VERY-HIGH senaryosu için ise %74,4 ve %21,2'dir. FOSSIL-BAN senaryosunda 2055 yılın dizel ve benzin tüketimi kaynaklı SGE miktarı baz senaryoya oranla yaklaşık %29 azalmıştır.



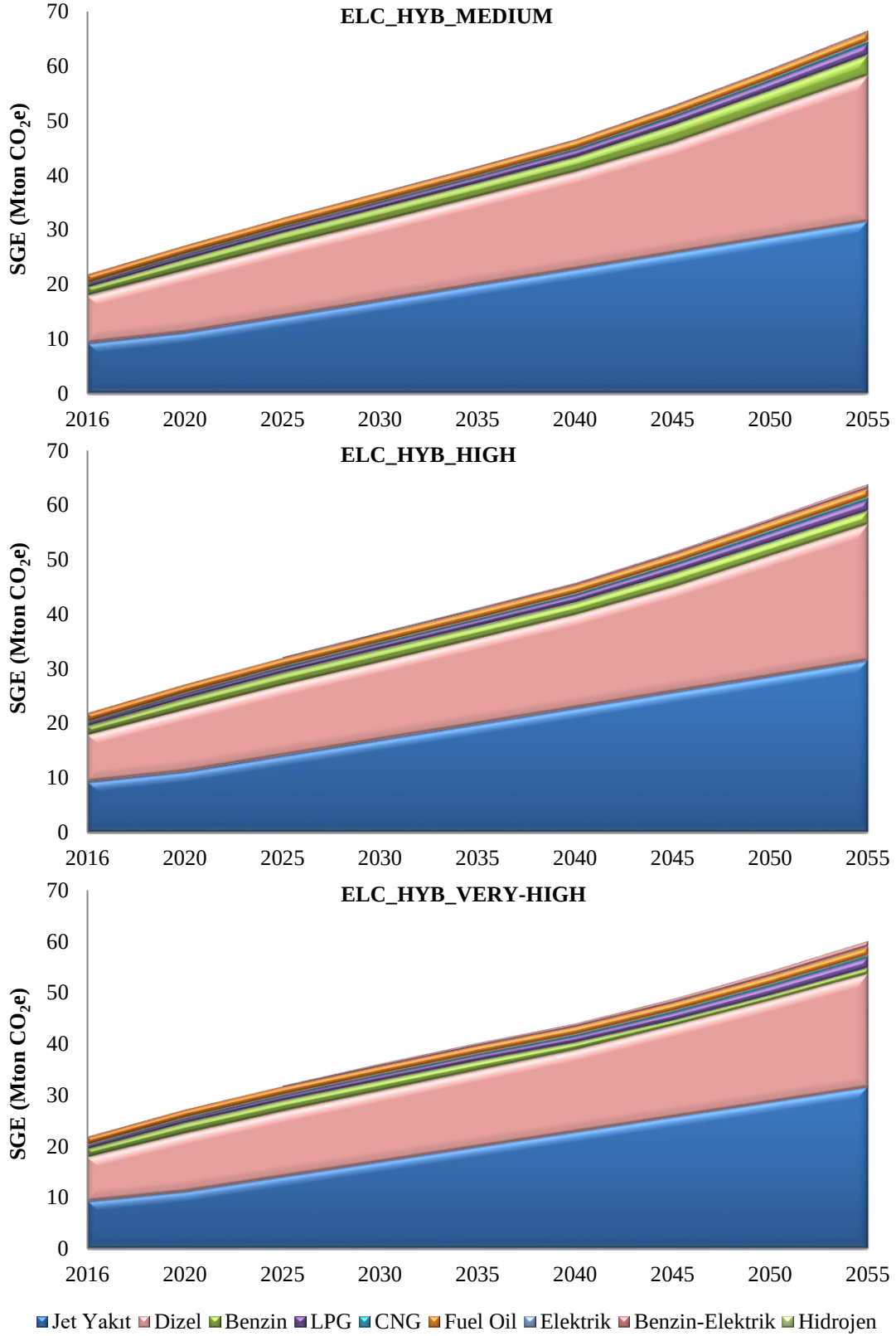
Şekil 8.24 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları.



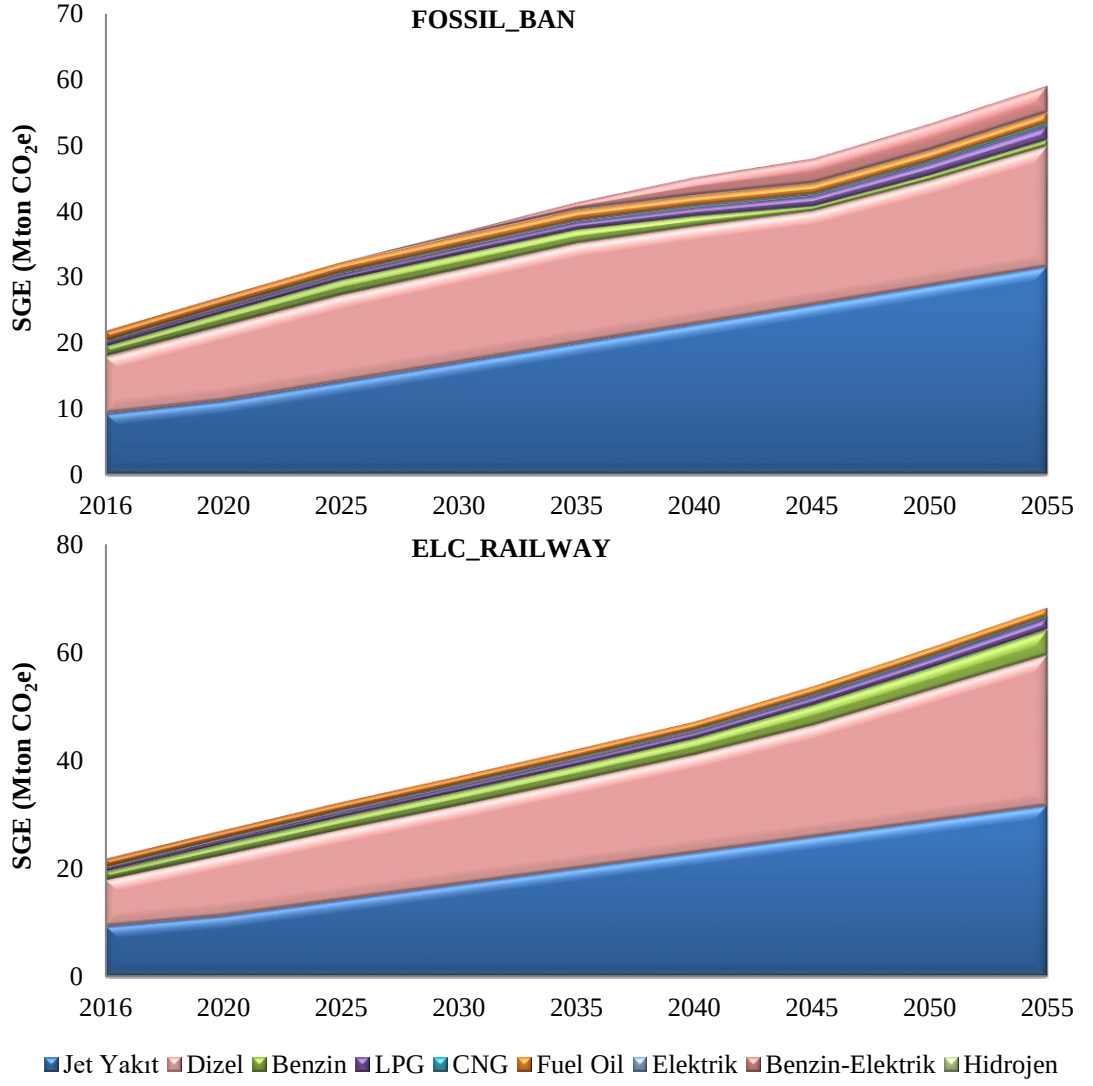
Şekil 8.24 (devam) : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmesi durumunda; farklı olarak uluslararası havayolu ulaşımı sebebiyle jet yakıtı kaynaklı sera gazı emisyonları tüm senaryolarda toplam emisyon miktarının yaklaşık yarısını oluşturmaktadır.

Elektrikli araç senaryolarında baz senaryoya oranla otomobil emisyonlarında gerçekleşen azalma oranları ELC-HYB-MEDIUM, ELC-HYB-HIGH, ELC-HYB-VERY-HIGH ve FOSSIL-BAN senaryoları için sırasıyla %12, %29, %53 ve %60'tır.

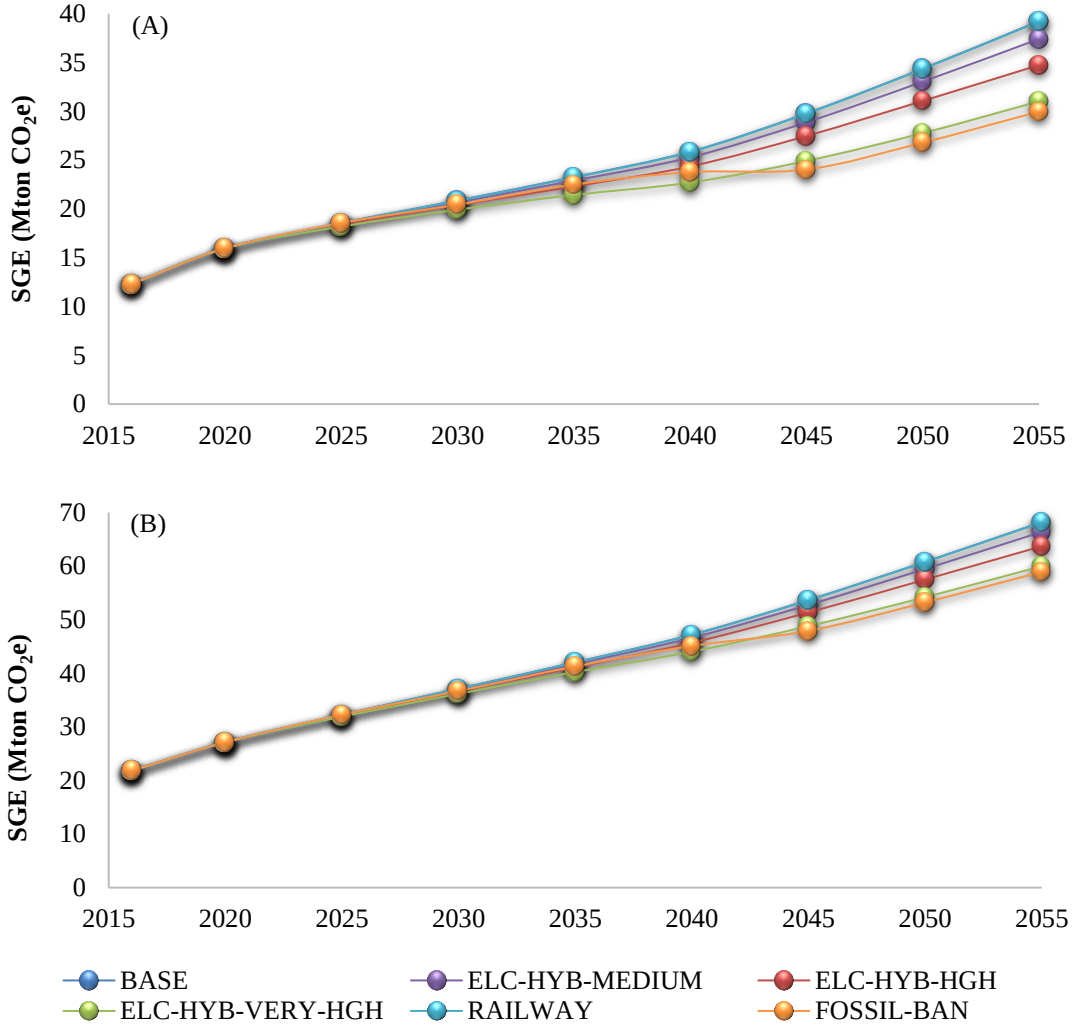


Şekil 8.25 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.



Şekil 8.25 (devam) : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda baz senaryoya göre toplam SGE azaltım oranları ELC-HYB-MEDIUM, ELC-HYB-HIGH, ELC-HYB-VERY-HIGH, FOSSIL-BAN ve ELC_RAILWAY için sırasıyla %4,7, %11,5, %21, %23,6 ve %0,1 olarak belirlenmiştir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda ise bu oranlar sırasıyla %2,7, %6,6, %12,1, %13,6 ve %0,1 olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.26 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları SGE azaltım oranları (A):UA dahil, (B):UA dahil.

Fosil yakıtlı araçların satışının yasaklanmasına veya LEZ uygulamasına ilişkin ülkemizde henüz bir plan ve politika bulunmamasına rağmen, dünya çapında bu tür kararlar gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır.

Ülkelerin almış oldukları bu kararların yanı sıra, otomotiv şirketleri de dizel ve benzinli araç üretimini durduracakları yönündeki kararlarını açıklamaktadır. Bu doğrultuda, Volkswagen Avrupa’da içten yanmalı motora sahip modellerin satışını 2035’de sona erdireceklerini, Toyota ise 2017 yılında yaptığı açıklamada 2040’tan itibaren içten yanmalı motor üretmeme kararı aldığını açıklamıştır. Honda da 2022 itibarıyla Avrupa’da sadece tam elektrikli ya da hibrit modeller satacağını belirtmiştir. Jaguar, Volvo, Bentley gibi diğer bazı firmalar da içten yanmalıdan vazgeçeceğini ve elektrikliye döneceğini açıklamıştır (Url-8).

Öte yandan, elektrikli ve hibrit araçların kullanımı giderek popüler hale gelmektedir. Elektrikli ve hibrit araçların kullanımına yönelik ülkemizde ve dünyada çok sayıda çalışma gerçekleştirilmektedir (Hou ve diğ., 2021; Märtz ve diğ., 2021; Xiong ve diğ., 2021; Zheng ve diğ., 2020; Creutzig ve Blythe, 2019; Chang ve Chung, 2018; Choi ve Song, 2018; Hill ve diğ., 2019; Mengi, 2018; Plötz ve diğ., 2017) Bu çalışmalardan birinde bataryalı elektrikli aracın ve plug-in hibrit elektrikli aracın çevresel etkisini içten yanmalı motoru olan benzinli araçlar ile karşılaştırması yapılmıştır. Çin’de gerçekleştirilen bu çalışma elektrikli ve hibrit araçların, benzinli araçlara göre küresel ısınma potansiyelinde sırasıyla %23 ve %17 azalma sağladığını göstermiştir (Zeng ve diğ., 2021).

Özellikle elektrikli araç kullanımında altyapı ve şarj istasyonlarının yaygınlaşması büyük önem arz etmektedir. Mevcut durumda ülkemizde tüm illerde şarj istasyonu bulunmakta olup, Kasım 2020 itibariyle İstanbul’da bulunan şarj istasyonu sayısı 248’e ulaşmıştır. Elektrikli araç satışları 2020 yılında bir önceki yıla göre %280, hibrit araç satışları ise %54 oranında artış göstermiştir (TEHAD, 2021).

8.3.4 Verimlilik ve emisyon limit senaryoları

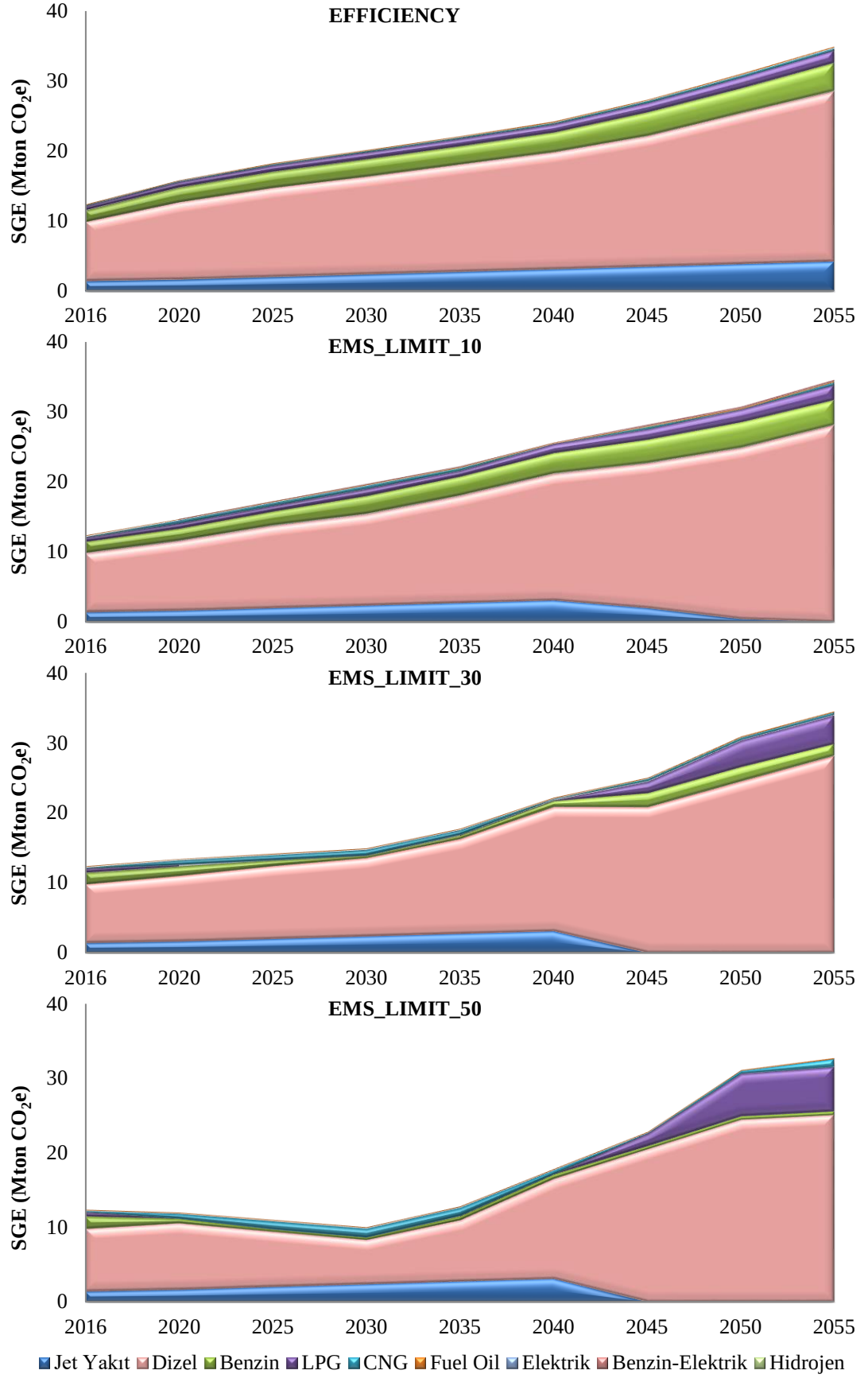
Karayolu teknolojilerinde verimlilik artışı yapılan ve emisyonlara üst limit koyulan senaryoların SGE miktarı sonuçları Çizelge 8.11 ve Şekil 8.27-Şekil 8.29’da verilmiştir.

Alt kategori bazında sera gazı emisyon sonuçlarına bakıldığında, verimlilik senaryosu için karayolu SGE miktarında bir azalma olduğu görülmektedir. Emisyonların ve yakıt tüketiminin büyük çoğunluğu karayolu ulaşımı sebebiyle olmaktadır. Bu sebeple, yalnızca karayolu teknolojilerinde verimlilik artışına gidilmiştir. Bu sebeple, değişim sadece karayolu alt kategorisinde gerçekleşmiştir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda alt kategori bazında sera gazı emisyon sonuçlarına bakıldığında, verimlilik senaryosu için havayolu ve denizyolu SGE miktarında artış olmuştur. Öte yandan, özellikle havayolu emisyonları açısından emisyon limit senaryolarında farklılıklar görülmektedir.

Çizelge 8.11 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları SGE miktarı, Mton CO₂e/yıl.

EFFICIENCY	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,2
Karayolu	10,2	13,5	15,5	16,9	18,5	20,2	22,9	26,1	29,6
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	17,2	19,8	22,3	24,9	27,4
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
EMS_LIMIT_10	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	2,0	0,4	0,0
Karayolu	10,2	12,4	14,5	16,5	18,6	21,6	25,2	29,2	33,5
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	9,3	11,3	14,2	17,1	20,0	22,1	23,5	24,5	25,3
Denizyolu-UA	10,2	12,4	14,5	16,5	18,6	21,6	25,2	29,2	33,5
EMS_LIMIT_30	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	0,0	0,0	0,0
Karayolu	10,2	11,0	11,3	11,6	14,0	18,1	24,0	29,8	33,3
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	9,3	11,3	14,2	17,1	17,9	17,2	14,6	12,1	11,8
Denizyolu-UA	10,2	11,0	11,3	11,6	14,0	18,1	24,0	29,8	33,3
EMS_LIMIT_50	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	0,0	0,0	0,0
Karayolu	10,2	9,6	8,2	6,7	9,1	13,8	21,8	30,0	31,6
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	9,3	11,3	14,2	17,1	16,2	13,1	6,6	0,0	0,0
Denizyolu-UA	10,2	9,6	8,2	6,7	9,1	13,8	21,8	30,0	31,6

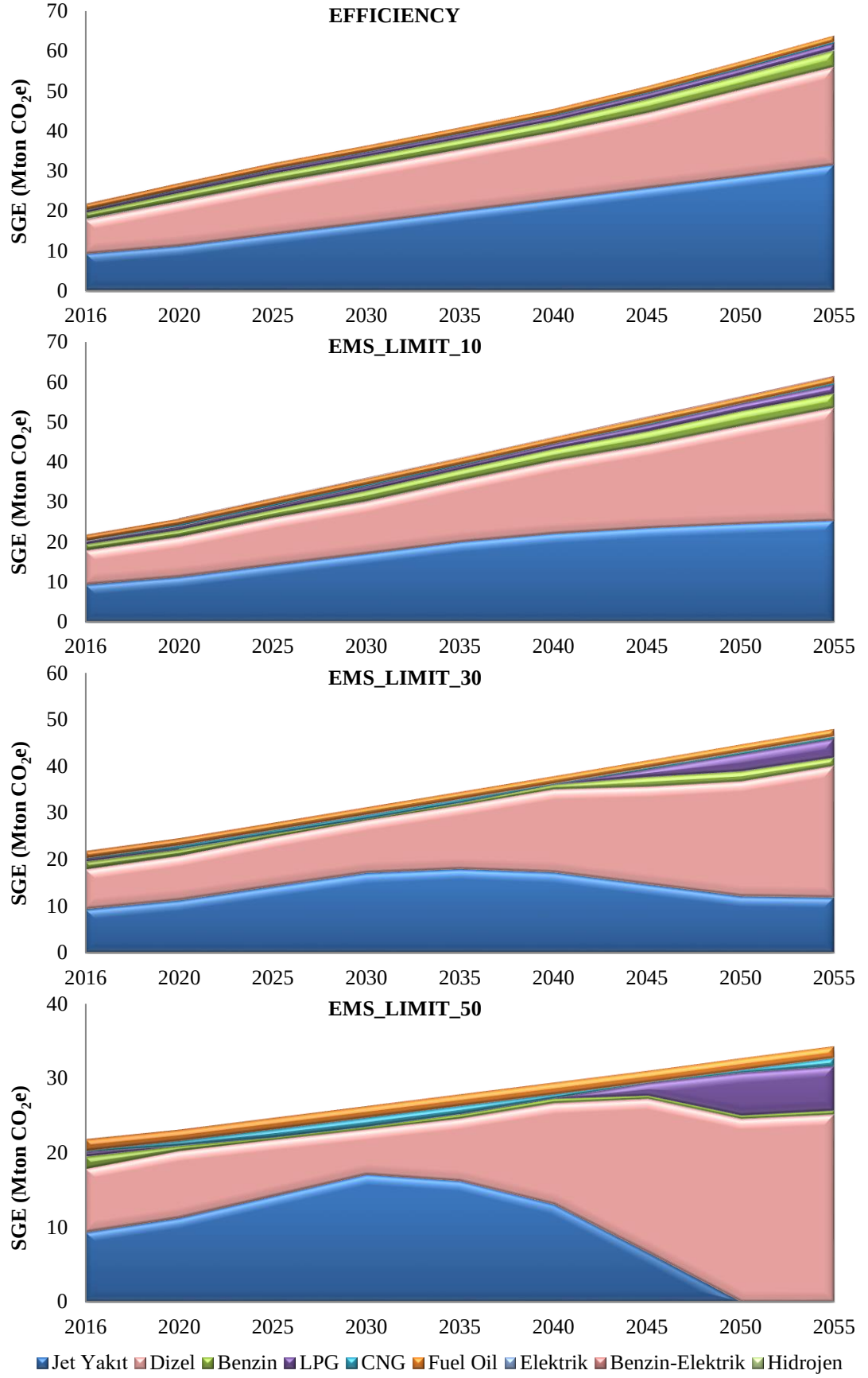
Havayolu ulaşımı talep biriminin PJ olması sebebiyle, yakıt tüketiminde meydana gelen farklılıklar toplu ele alındığında net görülememişti. Ancak, Çizelge 8.11'e bakıldığında emisyon limit senaryolarında özellikle son yıllarda havayolu emisyonlarının sıfırlandığı görülmektedir. Bu durumun sebebi, modelin koyulan üst emisyon limitini sağlamak için hidrojen yakıtlı uçak tercih etmesidir.



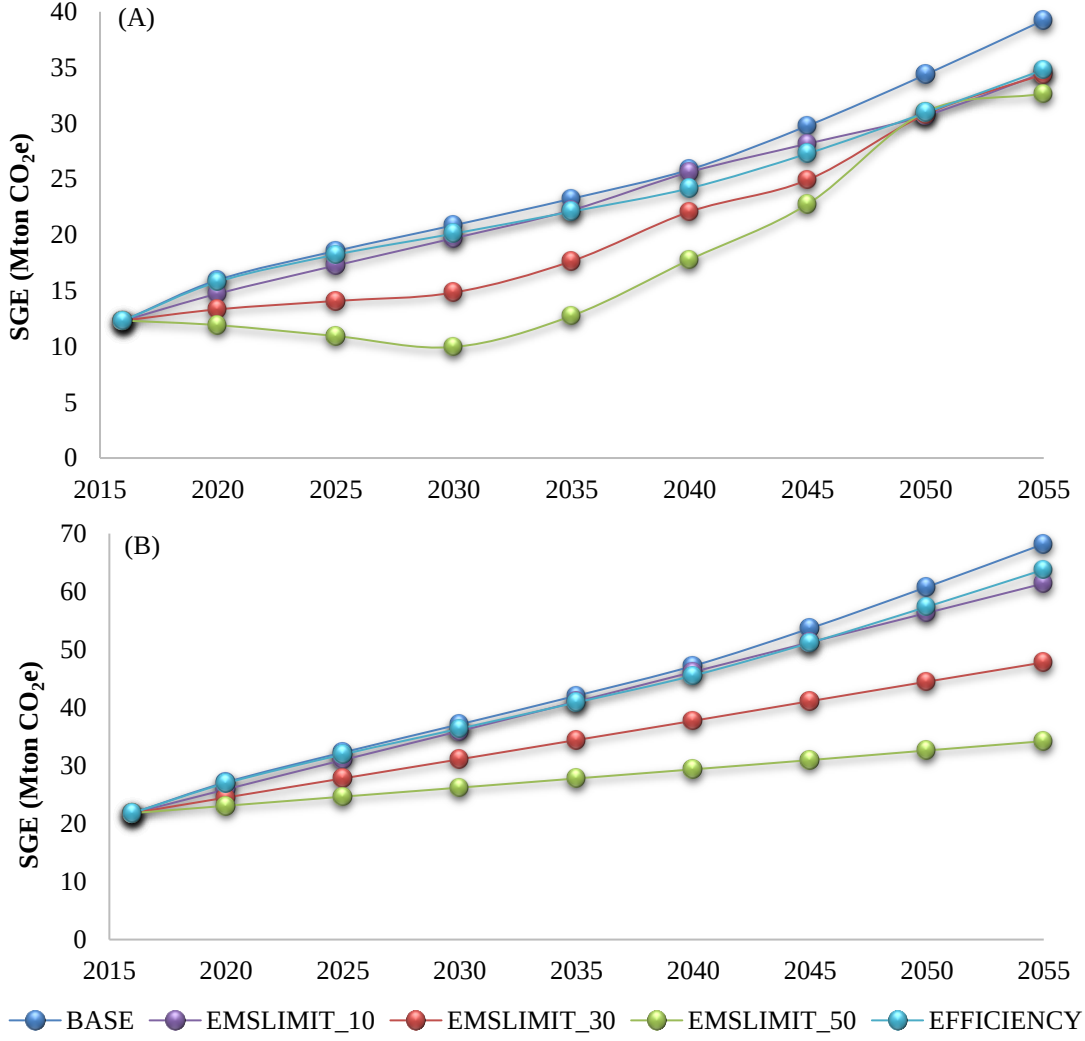
Şekil 8.27 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda emisyon limit senaryolarında jet yakıtının yerini hidrojen yakıtı, benzinli araçların yerini ise LPG'li araçlar almaktadır. Emisyon limit senaryolarında üst limit uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının da dahil olduğu toplam emisyonlar üzerinden yapıldığından etkisi diğer durumda daha fazla görülmektedir.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımı dahil edilmediğinde EMSLIMIT-10 ve EMSLIMIT-30 senaryolarında da hidrojen yakıtlı uçuşların tercih edilmesi sebebiyle son yıllarda jet yakıtının sıfırlandığı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumdaki sonuçlara bakıldığında ancak EMSLIMIT_50 senaryosunda model %50 emisyon azaltımına zorlandığında bu sonuca varılmıştır. Bu durum modelin emisyonlara sınır getirirken öncelikle kısa mesafe yurtiçi uçuşları için hidrojen yakıtı tercih ettiğini göstermektedir. Model bu tercihi koyulan kısıtları da göz önüne alarak maliyet optimizasyonu olacak şekilde yapmaktadır.



Şekil 8.28 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.



Şekil 8.29 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları SGE azaltım oranları
(A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda baz senaryoya göre sera gazı emisyon salımlarındaki azaltım oranları; EMSLIMIT_10, EMSLIMIT_30 ve EMSLIMIT_50 senaryoları için sırasıyla %12, %12,3 ve %16,8'dir. Verimlilik senaryosunda ise sera gazı emisyonu azaltım oranı yaklaşık %11,3'tür.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda baz senaryoya göre sera gazı emisyon salımlarındaki azaltım oranları ise EMSLIMIT_10, EMSLIMIT_30 ve EMSLIMIT_50 senaryoları için sırasıyla %10, %30 ve %50 şeklinde olup, zaten kullanıcı tarafından bu üst limitler koyulmuştur. Bu durumda modelin emisyonları azaltmak için karayolunda LPG yakıtlı araçlara, havayolunda ise hidrojen yakıtlı uçaklara yönelmiştir. Hidrojen yakıtına yönelerek emisyon üst limitini daha düşük maliyet ile sağlayabildiği için model elektrikli araç kullanımına

yönelmemiştir. Verimlilik senaryosunda sera gazı emisyonu azaltım oranı yaklaşık %6,5'tir.

8.3.5 Hidrojen yakıtlı araç senaryoları

Hidrojen yakıtlı araç senaryolarının sera gazı emisyon sonuçları Çizelge 8.12 ve Şekil 8.30-Şekil 8.32'de verilmiştir.

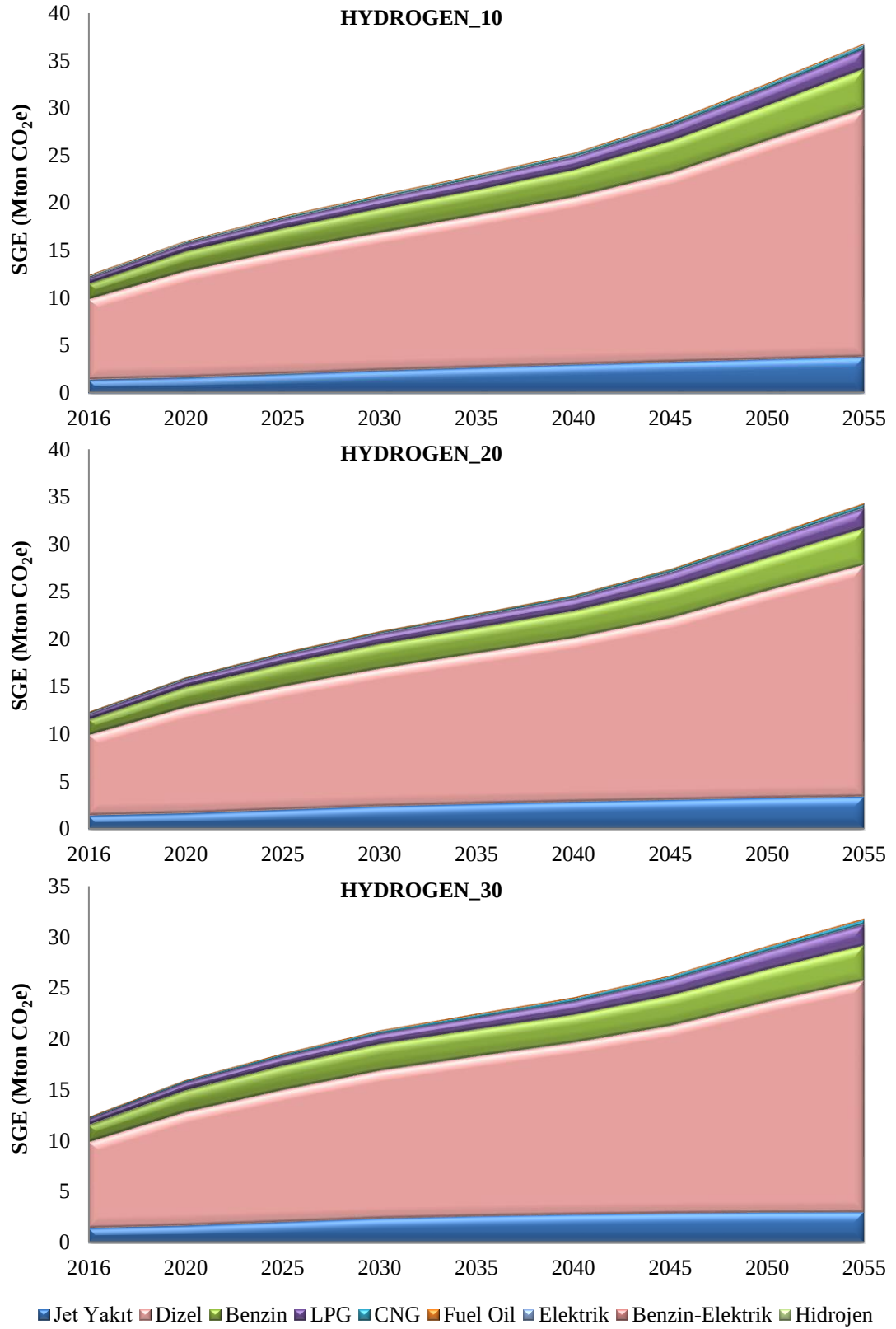
Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durum için alt kategori bazında sera gazı emisyon sonuçları incelendiğinde hidrojen yakıtının modelde uçak, otomobil, kamyon ve otobüslerde kullanılması sebebiyle her üç senaryoda da karayolu ve havayolu ulaşımı kaynaklı emisyonların, yakıt tüketimi sonuçlarına paralel olarak etkilendiği görülmektedir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda farklı olarak havayolu ve denizyolu toplam sera gazı emisyon miktarlarında artış olmuştur.

Çizelge 8.12 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları SGE miktarı, Mton CO₂e/yıl.

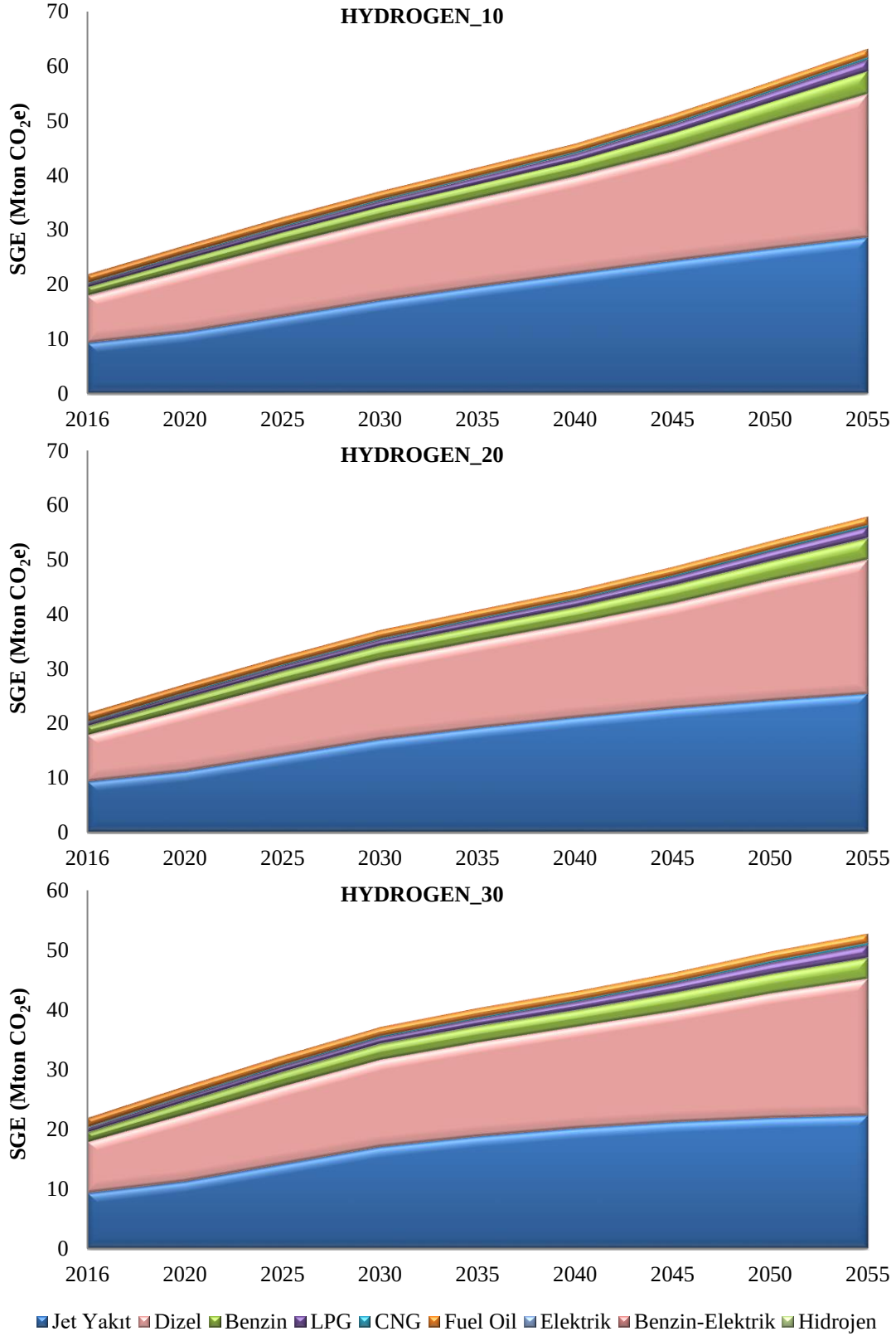
HYDROGEN-10	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,0	3,2	3,5	3,8
Karayolu	10,2	13,6	15,8	17,6	19,4	21,3	24,3	28,1	31,9
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	16,9	19,0	21,0	23,0	24,8
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
HYDROGEN-20	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4
Karayolu	10,2	13,6	15,8	17,6	19,2	20,8	23,4	26,6	29,8
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	16,6	18,2	19,7	21,0	22,1
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
HYDROGEN-30	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,2
Karayolu	10,2	13,6	15,8	17,6	19,0	20,4	22,4	25,1	27,7
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	16,2	17,4	18,4	19,0	19,3
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durum için, HYDROGEN-10 senaryosunda 2055 yılında baz senaryoya kıyasla sera gazı emisyonundaki azalmalar jet yakıtı, benzin, dizel, CNG ve LPG için sırasıyla %9,5, %8,2, %6,1, %1,9 ve %0,3 şeklindedir. Aynı değerler HYDROGEN-20 senaryosu için %19,5, %16,5, %12,1, %3,8 ve %0,7 iken HYDROGEN-30 senaryosu için %29,5 %24,7, %18,2, %5,8 ve %1'dir

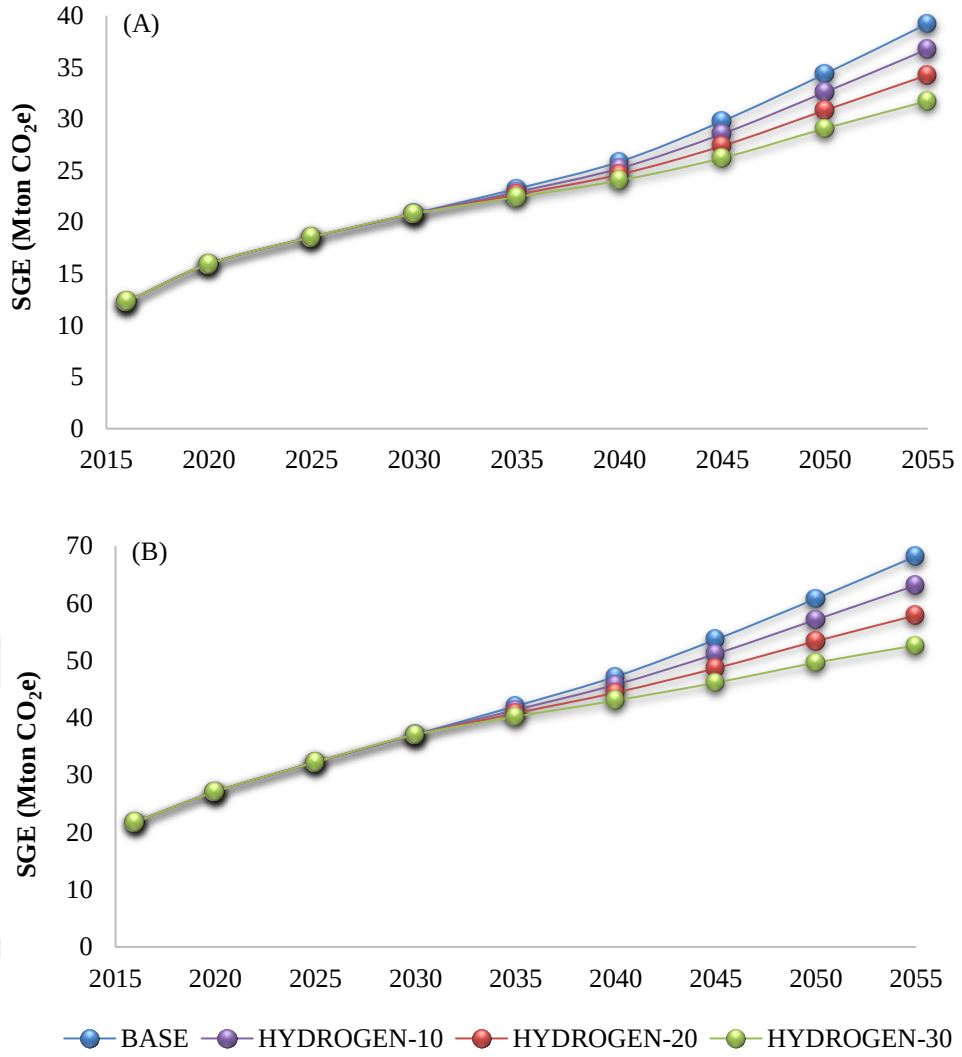




Şekil 8.30 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları.



Şekil 8.31 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları yakıt türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.



Şekil 8.32 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları SGE azaltım oranları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda baz senaryoya göre toplam SGE azaltım oranları HYDROGEN-10, HYDROGEN-20 ve HYDROGEN-30 senaryoları için sırasıyla %6,3, %12,7 ve %19,1 olarak elde edilmiştir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda baz senaryoya göre toplam SGE azaltım oranları ise HYDROGEN-10, HYDROGEN-20 ve HYDROGEN-30 senaryoları için sırasıyla %7,4, %15,1 ve %22,8'dir.

Hali hazırda hidrojen yakıtlı teknoloji maliyetlerinin konvansiyonel teknolojilere oranla yüksek olması sebebiyle model kullanıcı tarafından tanımlanan şartlarda çalışmaya zorlanmıştır. Hidrojen yakıtlı araç senaryolarında yalnızca uçak, otomobil, otobüs ve kamyon için talebin %10, %20 ve %30'unun hidrojen yakıtlı teknolojilerden

karşılanması durumunda sera gazı azaltım miktarı hesaplanmasına rağmen yüksek emisyon azaltımları elde edilmiştir.

Son yıllarda hidrojen teknolojiye ilişkin yapılan çalışmalar hız kazanmıştır (Keller ve diğ., 2021; Esenarro ve diğ., 2020; Gurz ve diğ., 2017). Hidrojenle çalışan araçların çok sayıda faydası bulunmaktadır. Bunların en önemlilerinden biri hidrojen yakıtlı araçların diğer klasik araçların aksine çevreye kirletici yaymamaları ve sera gazlarının azaltılmasıdır. Ayrıca, hızlı yakıt ikmali sayesinde elektrikli araçları şarj etme sürecine benzer uzun bekleme sürelerinin olmamasıdır. Menzilleri içten yanmalı motorlarla donatılmış klasik araçlara yakın olup, daha yüksek verimle titreşimsiz ve gürültüsüz çalışabilmektedirler. Öte yandan, hidrojen tedariği için uygun altyapının yetersiz olması ve yatırım maliyetlerinin yüksek olması en önemli dezavantajlarıdır (Turoń, 2020). Ancak, zamanla bu maliyetlerin elektrikli araçlarda olduğu gibi düşmesi beklenmektedir.

8.3.6 Toplu önlem senaryosu

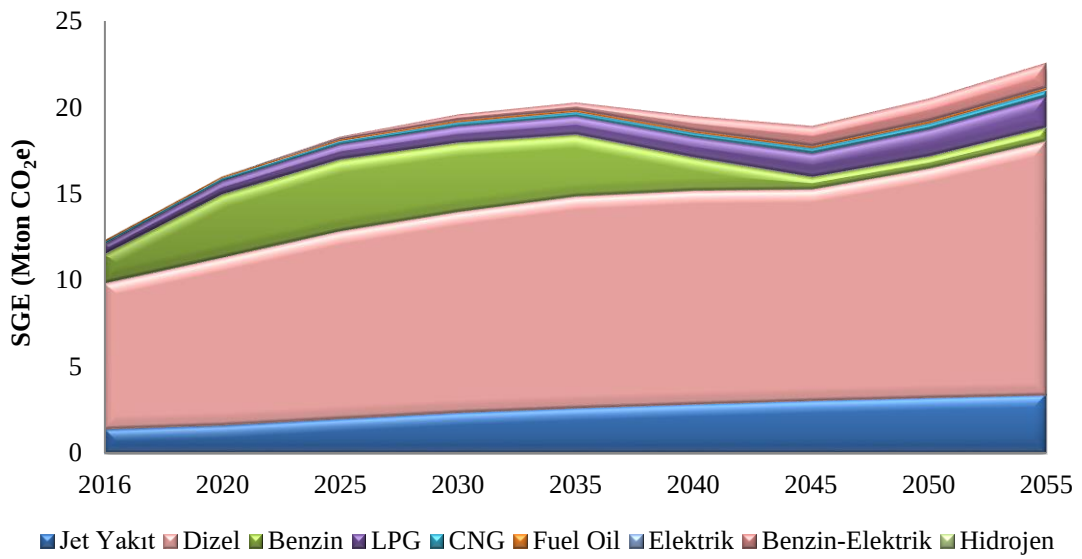
Toplu önlem senaryosu sera gazı emisyon Çizelge 8.13 ve Şekil 8.33-Şekil 8.35’de verilmiştir. Toplu önlem senaryolarında birden fazla azaltım önlemi aynı anda ele alındığından azaltım oranlarının diğer senaryolara oranla yüksek olması beklenmektedir.

Çizelge 8.13 : Toplu önlem senaryosu yakıt tüketimleri, PJ/yıl.

Alt kategori	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Havayolu	1,4	1,6	2,0	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4
Karayolu	10,2	13,7	15,5	16,4	16,7	15,7	14,9	16,3	18,1
Demiryolu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denizyolu	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0
Havayolu-UA	7,9	9,6	12,2	14,7	16,6	18,2	19,7	21,0	22,1
Denizyolu-UA	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6

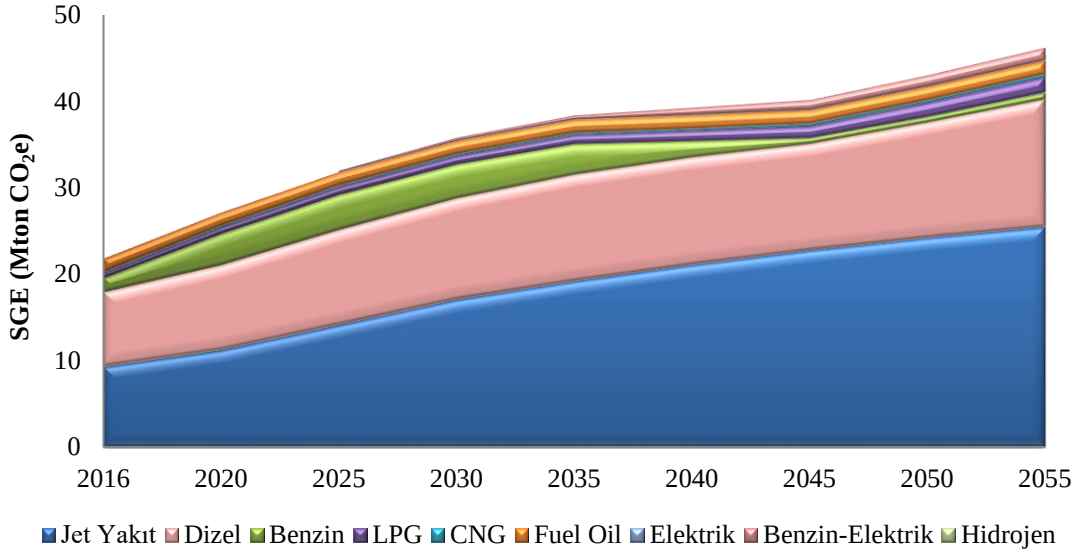
Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda alt kategori bazında emisyon sonuçları incelendiğinde baz senaryoya göre tüm alt kategorilerde değişiklik olduğu görülmektedir. Özellikle karayolu ve ulusal havayoluna ait sera gazı salımlarında sırasıyla %47 ve %25 oranında azaltım sağlanmıştır. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda farklı olarak havayolu ve denizyolu salımlarında artış olmuştur.

Dizel ve benzinli araç satışının yasaklandığı 2030 yılı elektrik ve hibrit araçların artışı, hidrojen yakıtlı teknolojilerin devreye girdiği 2035 yılı hidrojen yakıt tüketiminin başlaması açısından kritiktir. Öte yandan, dizel ve benzin yakıtlı otomobillerin 2030 yılında satışının yasaklanması ile trafikte olmaya devam eden mevcut otomobiller 2045 yılında artık tükenmiştir. Özellikle benzin kaynaklı emisyonların bu yılda yoğun düşüşü bu sebeple olmaktadır. Dizel otomobil kaynaklı emisyonlarda da aynı yıl baz senaryoya göre yaklaşık %41’lik bir azalma söz konusudur, ancak diğer dizel araçların tüketimleri sebebiyle benzer bir görüntü oluşmamış artış eğimi azalmıştır.

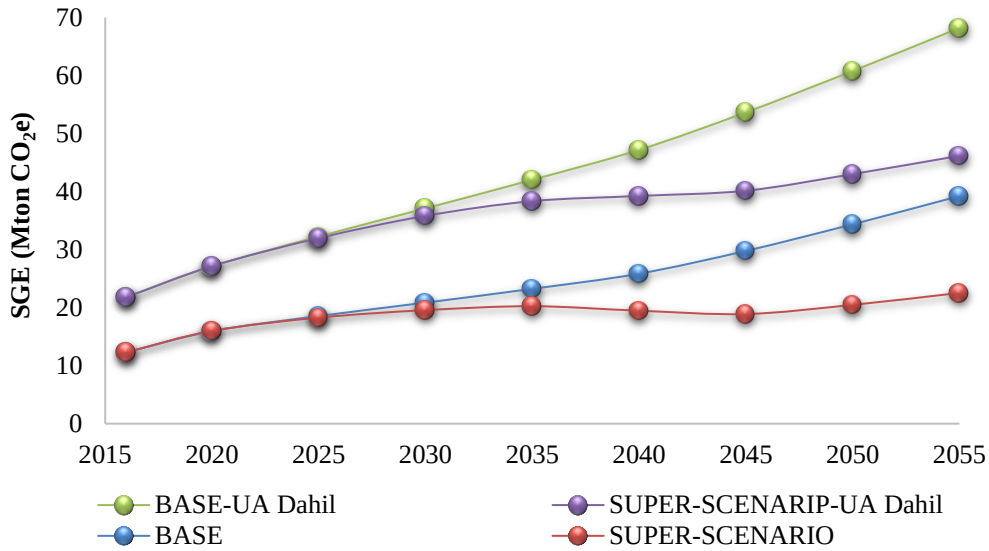


Şekil 8.33 : Toplu önlem senaryosu yakıt türüne göre sera gazı emisyonları.

Uluslararası havayolu da dikkate alındığında baz senaryo sonuçlarında dizel ve jet yakıtı kaynaklı sera gazı emisyonları birbirlerine yakın iken toplu önlem senaryosunda jet yakıtı emisyonu dizel emisyonunun 1,7 katıdır. Bu durumun sebebi, alınan önlemlerin daha çok karayolu ulaşımında uygulanacak olmasıdır. Hidrojen yakıtlı uçaklar 2035 yılı itibariyle devreye girse de çok sınırlı olmaktadır.



Şekil 8.34 : Toplu önlem senaryosu yakıt türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.



Şekil 8.35 : Toplu önlem senaryosu SGE azaltım oranları.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda baz senaryoya göre toplam SGE azaltım oranı 2055 yılında %42,6 olarak elde edilmiştir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda ise 2055 yılında SGE azaltım oranı %32,3 olarak elde edilmiştir.

Toplu önlem senaryosunda, mevcut durumda uygulanan plan, politika ve ulaştırma stratejileri göz önüne alındığında daha gerçekçi olması adına yalnızca EFFICIENCY, ELC_RAILWAY, ELC_HYB_HIGH, FOSSIL BAN ve HYDROGEN-20 senaryoları ele alınmıştır. Ancak, hem elektrikli ve hibrit araçlar için en yüksek büyüme senaryosu, hem hidrojen yakıtlı araçlar için HYDROGEN-30 senaryosu hem de

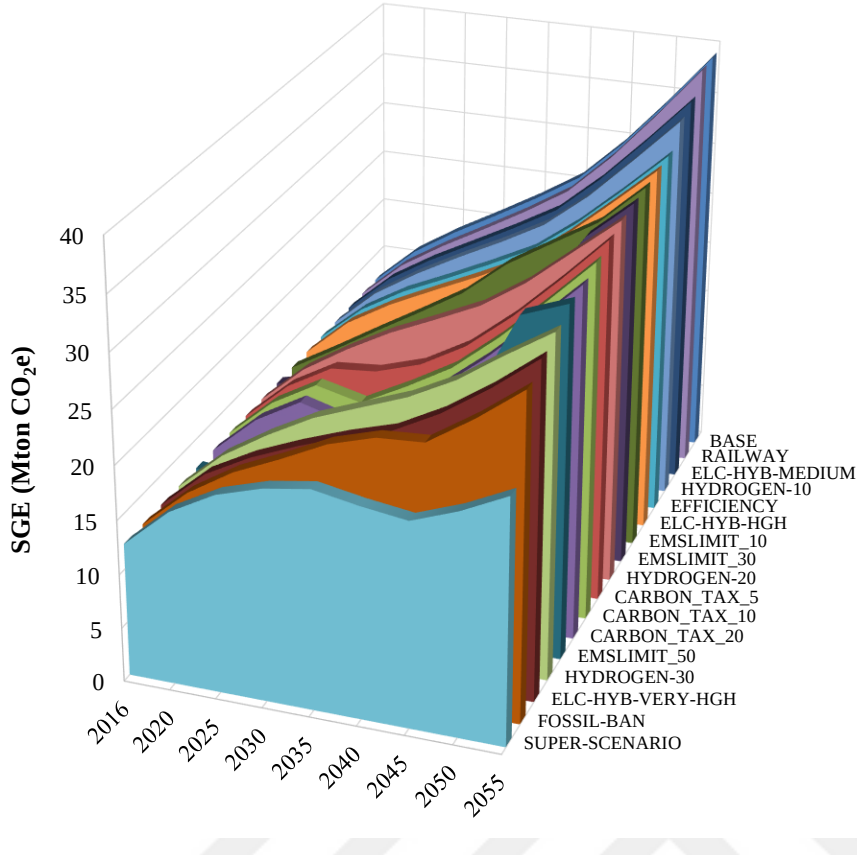
karbon vergisi senaryolarının SUPER-SCENARIO'ya dahil edilmemesine rağmen oldukça yüksek azaltım oranları elde edilebilmiştir.

8.3.7 Sera gazı emisyonlarının karşılaştırılması

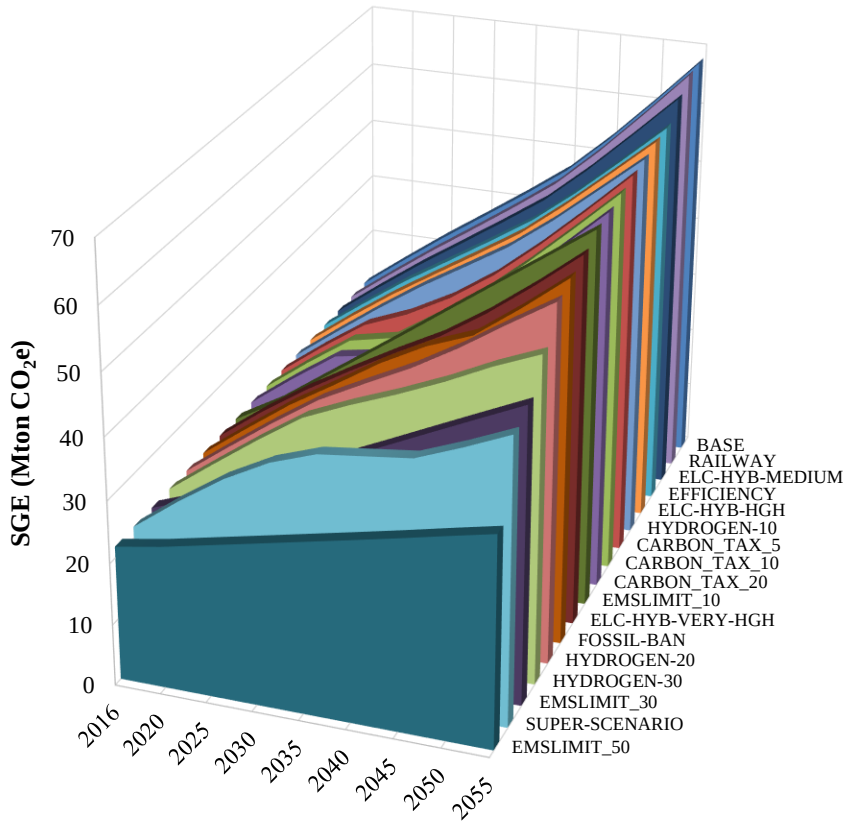
Sera gazı emisyonlarına ilişkin değerlendirmeler daha anlaşılabilir olması açısından senaryo grupları şeklinde yapılmıştır. Tüm senaryoların toplu olarak sera gazı emisyon sonuçları Şekil 8.36'da gösterilmiştir. Bu kapsamda, toplu önlem senaryosundan sonra fosil yakıtlı araç satışının yasaklanmasının, elektrikli-hibrit otomobil kullanımının yaygınlaştırılmasının ve karbon vergisi uygulanmasının, etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda emisyonlara %50 azaltım limiti getirilen ve 34 Mton CO₂e sera gazı azaltımı gerçekleşen EMSLIMIT_50 senaryosu dışında, toplu önlem senaryosunda uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımı dahil edildiğinde 22 Mton CO₂e, dahil edilmediğinde ise 17 Mton CO₂e sera gazı azaltımı gerçekleşmiştir.

(A)



(B)



Şekil 8.36 : Sera gazı emisyonlarının toplu karşılaştırması (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

8.3.8 Elektrik üretim emisyonları

Senaryolarda yoğunlukla elektrikli araç teknolojisi ele alınmış olup, sera gazı azaltımı açısından iyi bir seçenek olduğu değerlendirilmiştir. Oysa elektrik üretim aşamasında yoğun sera gazı emisyonu olmakta, bu miktar kullanılan yenilenebilir enerji miktarına göre değişmektedir. Yapılan çalışma kapsamında, elektrik üretimi kaynaklı sera gazı emisyonları da ayrı olarak hesaplaması yapılmıştır. Hesaplamalar yapılırken Enerji Denge Tablosu ve CRF tablolarında yer alan verilerden faydalanılarak emisyon faktörü hesaplanmıştır. Mevcut durumda üretilen elektriğin yaklaşık %33'ü yenilenebilir enerjiden üretilmektedir. Yenilenebilir enerji kullanımının %40, %60 ve %80 olması durumunda da ayrı emisyon faktörleri hesaplanmış olup, bu faktörler kullanılarak senaryoların emisyon azaltım oranları hesaplanmıştır (Şekil 8.37).

Sonuçlara bakıldığında model sonucunda elde edilen emisyon azaltım oranları mevcut durumda elektrik üretim emisyonları da dahil edildiğinde oldukça düşmektedir. Ancak elektrik üretiminde yenilenebilir enerjinin payının artırılması durumunda yakın azaltım oranları yakalanabilmektedir.

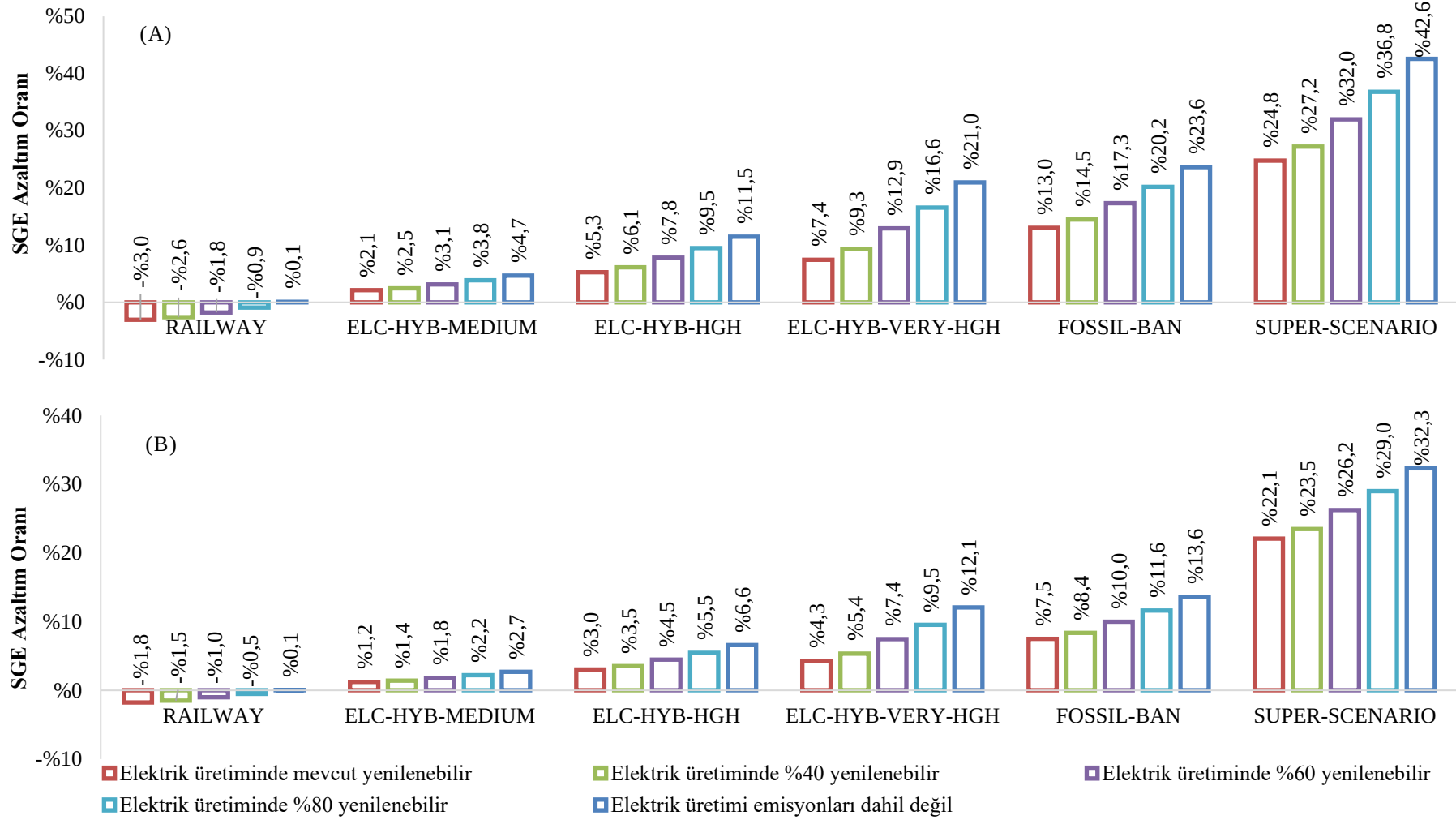
Uluslararası havayolu ulaşımının dahil edilmediği durumda toplu önlem senaryosunda sera gazı azaltım oranının %42,6 olarak elde edildiği belirtilmişti. Ulaşımda kullanılan elektrik miktarının üretimine ilişkin emisyon miktarları da sonuçlara dahil edildiğinde; %80 yenilenebilir enerji olması durumunda bu azaltım oranı yaklaşık %37'ye %60 yenilenebilir enerji olması durumunda %32'ye, %40 yenilenebilir enerji olması durumunda %27'ye ve mevcut durumdaki yenilenebilir enerji ile yaklaşık %25'e düşmektedir.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda toplu önlem senaryosunda benzer şekilde sera gazı azaltım oranı %32,3 olarak elde edilmişti. Ulaşımda kullanılan elektrik miktarının üretimine ilişkin emisyon miktarları da sonuçlara dahil edildiğinde; %80 yenilenebilir enerji olması durumunda bu azaltım oranı yaklaşık %29'a %60 yenilenebilir enerji olması durumunda %26'ya, %40 yenilenebilir enerji olması durumunda %23,5'e ve mevcut durumdaki yenilenebilir enerji ile yaklaşık %22'ye düşmektedir.

Diğer senaryolar için de benzer bir durum söz konusudur. Hatta ELC_RAILWAY senaryosunda azaltımdan öte sera gazı salımlarında artış olması söz konusu olmuştur.

Sonuçlardan da anlaşılabileceği gibi ulaşımda elektrikli araçların sağlayacağı çevresel fayda değerlendirilirken elektrik üretiminin de göz önünde bulundurulması önem arz etmektedir.





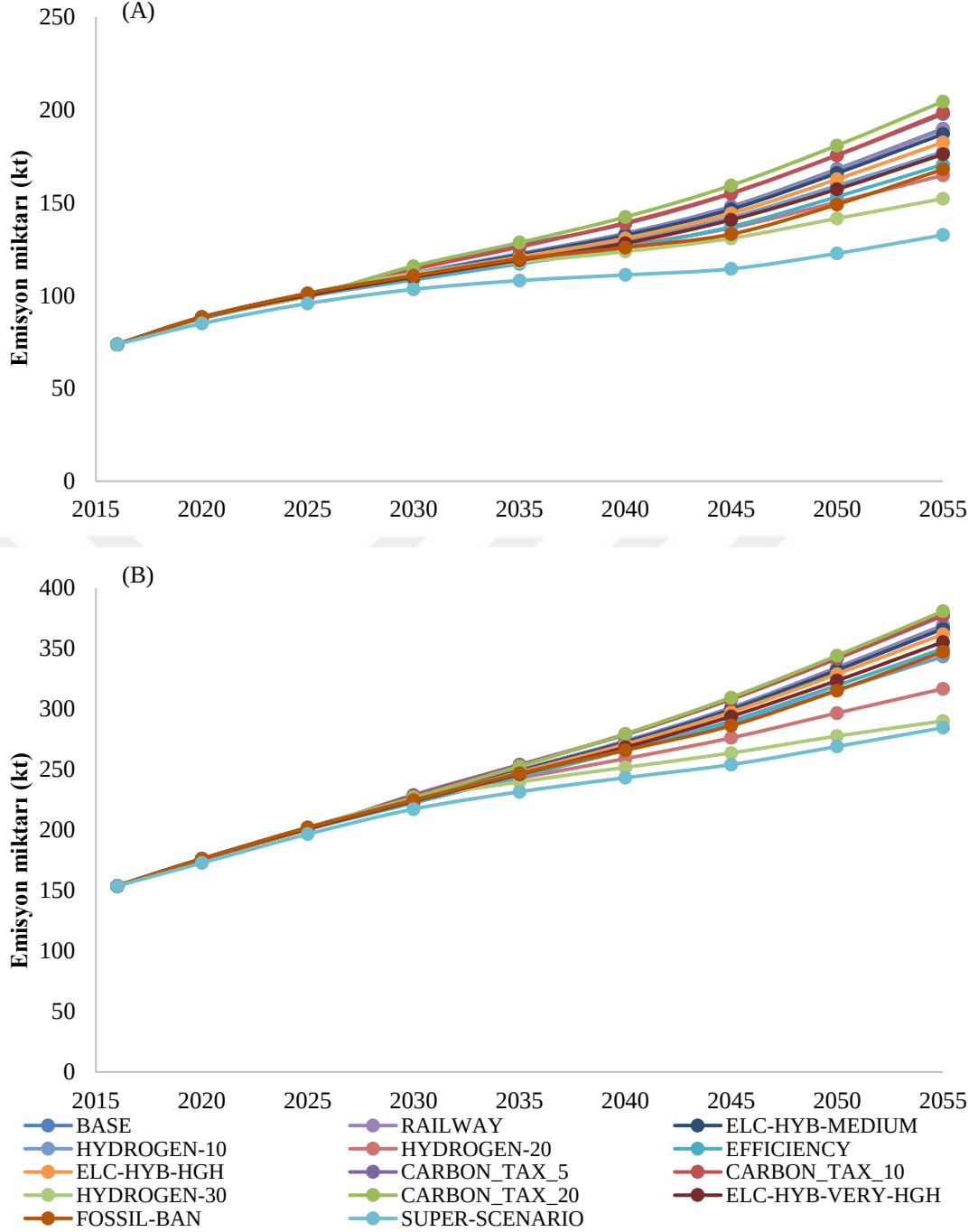
Şekil 8.37 : Elektrik üretimi kaynaklı sera gazı emisyonlarının emisyon azaltım oranlarına etkisi, (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

8.4 Hava Kirliliği Emisyonları

Ulaştırma sektörü, özellikle fosil yakıtlarla çalışan araçlar sebebiyle hava kirliliğine büyük katkıda bulunmakta olup, insan sağlığı üzerinde de olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Bu sebeple, hava kirliliği emisyonları da tez çalışması kapsamında ele alınmış olup, NO_x emisyonlarına ilişkin sonuçlar Şekil 8.38’de verilmiştir. Hava kirliliği emisyonlarına ait sonuçlar kapsamında, halihazırda sera gazı emisyon azaltımı için üst limit getirilmiş olan senaryolar değerlendirilmemiştir.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda karbon vergisi senaryolarında baz senaryoya göre 2055 yılında %4-%8 arasında bir artış söz konusudur. Bu durumun temel sebebi, modelin teknoloji maliyetlerini de göz önüne alarak sera gazı azaltımını çoğunlukla benzinli araçlar üzerinden yapması ve yerine daha yüksek emisyon faktörüne sahip dizel yakıtlı araçları tercih etmesidir. Öte yandan, toplu önlem senaryosunda baz senaryoya oranla 2055 yılında NO_x emisyonlarında %30 azaltım sağlanabilmiştir. Bu değeri, %20 ile HYDROGEN-30, %13 ile HYDROGEN-20, %12 ile FOSSIL-BAN ve %10 ile verimlilik senaryosu izlemektedir. Elektrikli araçların devreye girdiği senaryolarda ise bu azaltım oranları %2-%7 arasında değişim göstermiştir.

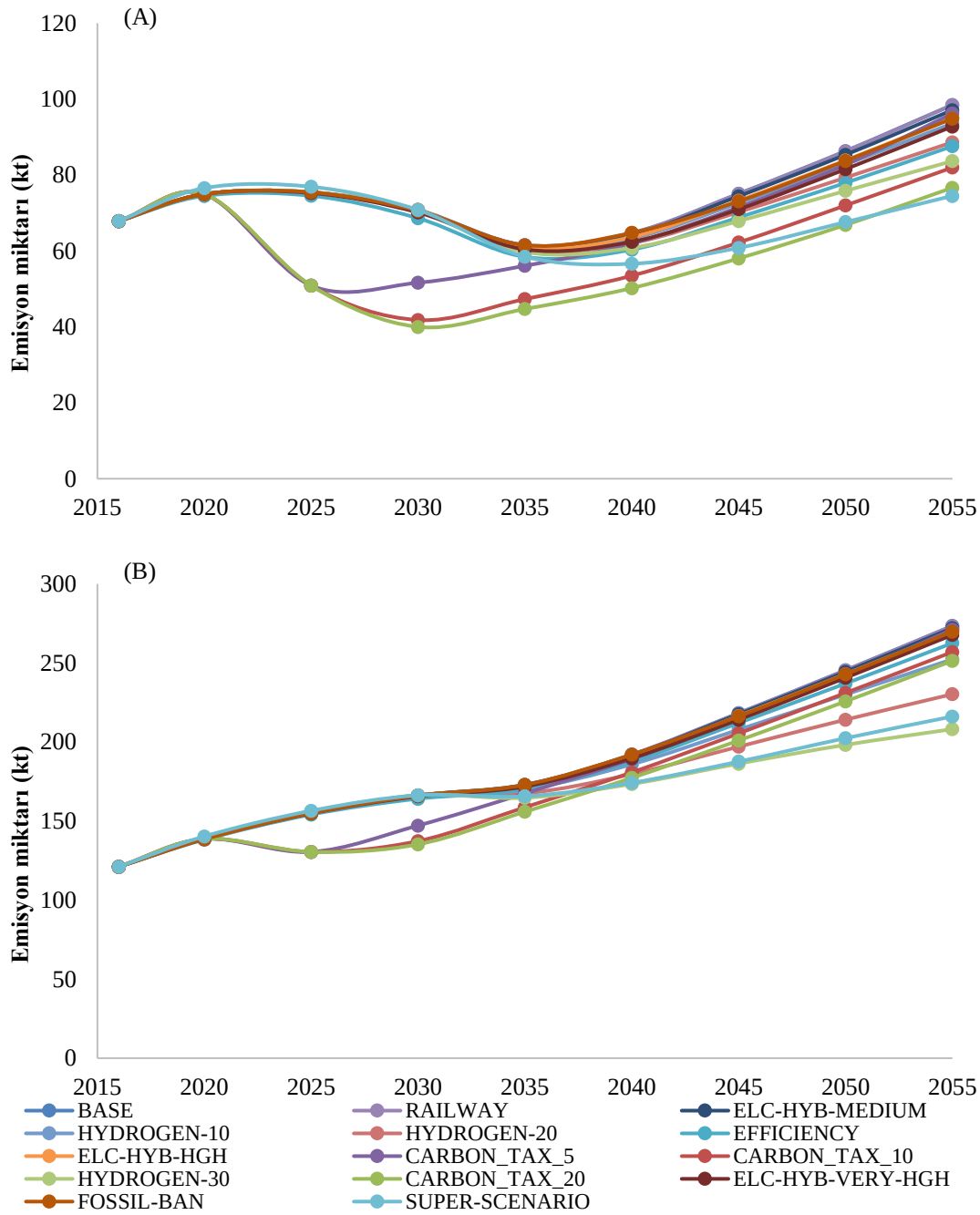
Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda ise karbon vergisi senaryolarında baz senaryoya göre 2055 yılında %2-%3 arasında bir artış söz konusudur. Toplu önlem senaryosunda baz senaryoya oranla 2055 yılında NO_x emisyonlarında % 23 ile en yüksek azaltım sağlanmıştır. Bu değeri, %21 ile HYDROGEN-30, %14 HYDROGEN-20 senaryoları izlemektedir. Elektrikli araçların devreye girdiği senaryolarda ise bu azaltım oranları %1-%4 arasında değişim göstermiştir.



Şekil 8.38 : NOx emisyonları, (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

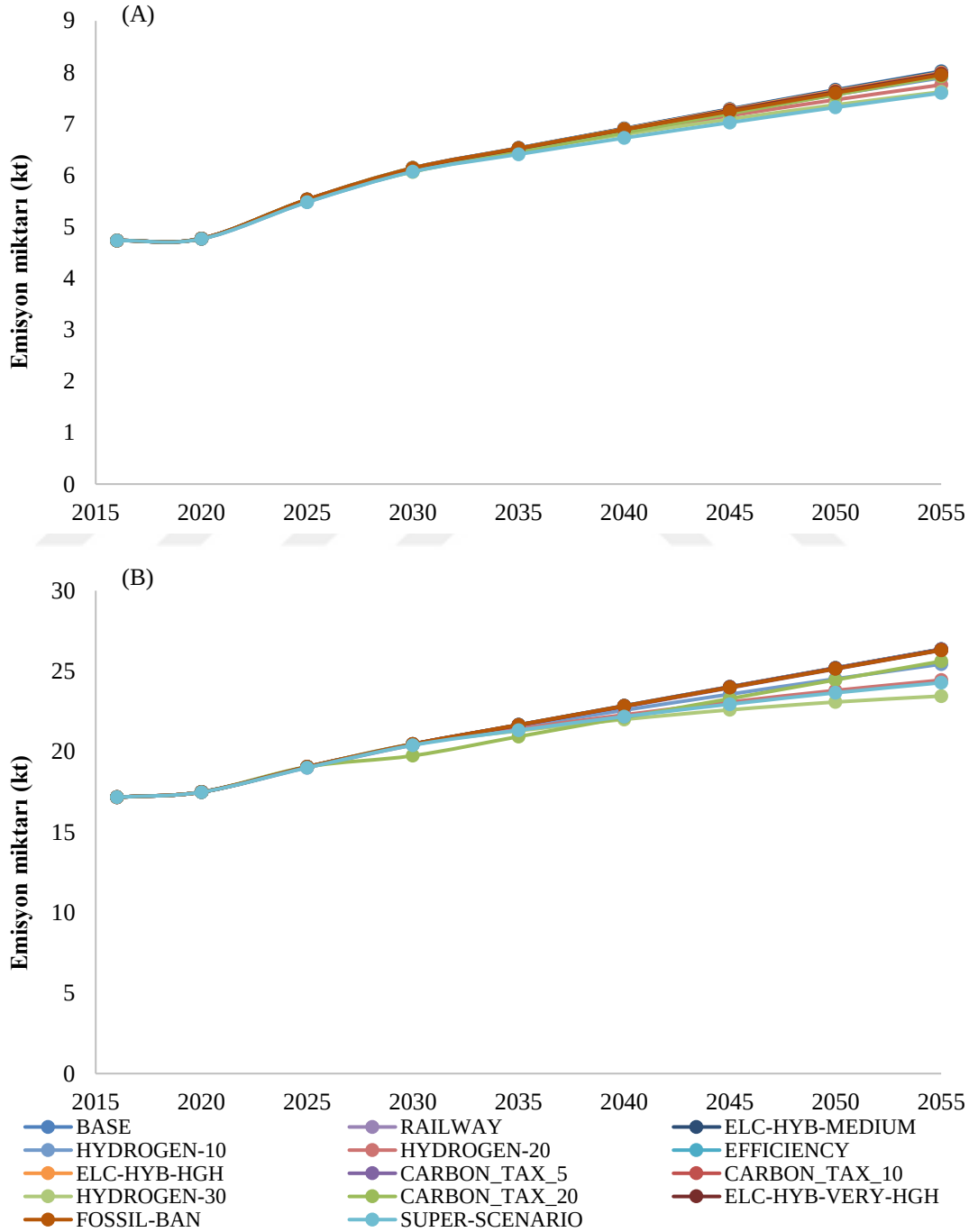
Diğer bir kirletici parametre olan CO emisyonlarına ilişkin sonuçlar Şekil 8.39'da verilmiştir. Genel anlamda tüm senaryolarda 2055 yılında azaltım sağlanmış olmasına rağmen, karbon vergisi senaryolarında dalgalı bir profil söz konusudur. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda en yüksek azaltım %24 ile toplu önlem senaryosunda gerçekleşmiştir. Bu değeri, %22 ile CARBON_TAX_20, %17 ile CARBON_TAX_10, %15 ile HYDROGEN-30, ve %11 ile EFFICIENCY senaryoları izlemektedir. Elektrikli araçların devreye girdiği

senaryolarda ise bu azaltım oranları %1-%6 arasında değişim göstermiştir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda ise baz senaryoya oranla 2055 yılında CO emisyonlarında en yüksek azaltım oranı, % 24 ile HYDROGEN-30 senaryosunda sağlanabilmektedir. Bu değeri, %21 ile toplu önlem senaryosu ve %16 HYDROGEN-20 senaryoları izlemektedir. Elektrikli araçların devreye girdiği senaryolarda ise bu azaltım oranları %1-%3 arasında, karbon vergisi senaryolarında ise %1-%8 arasında değişim göstermiştir.



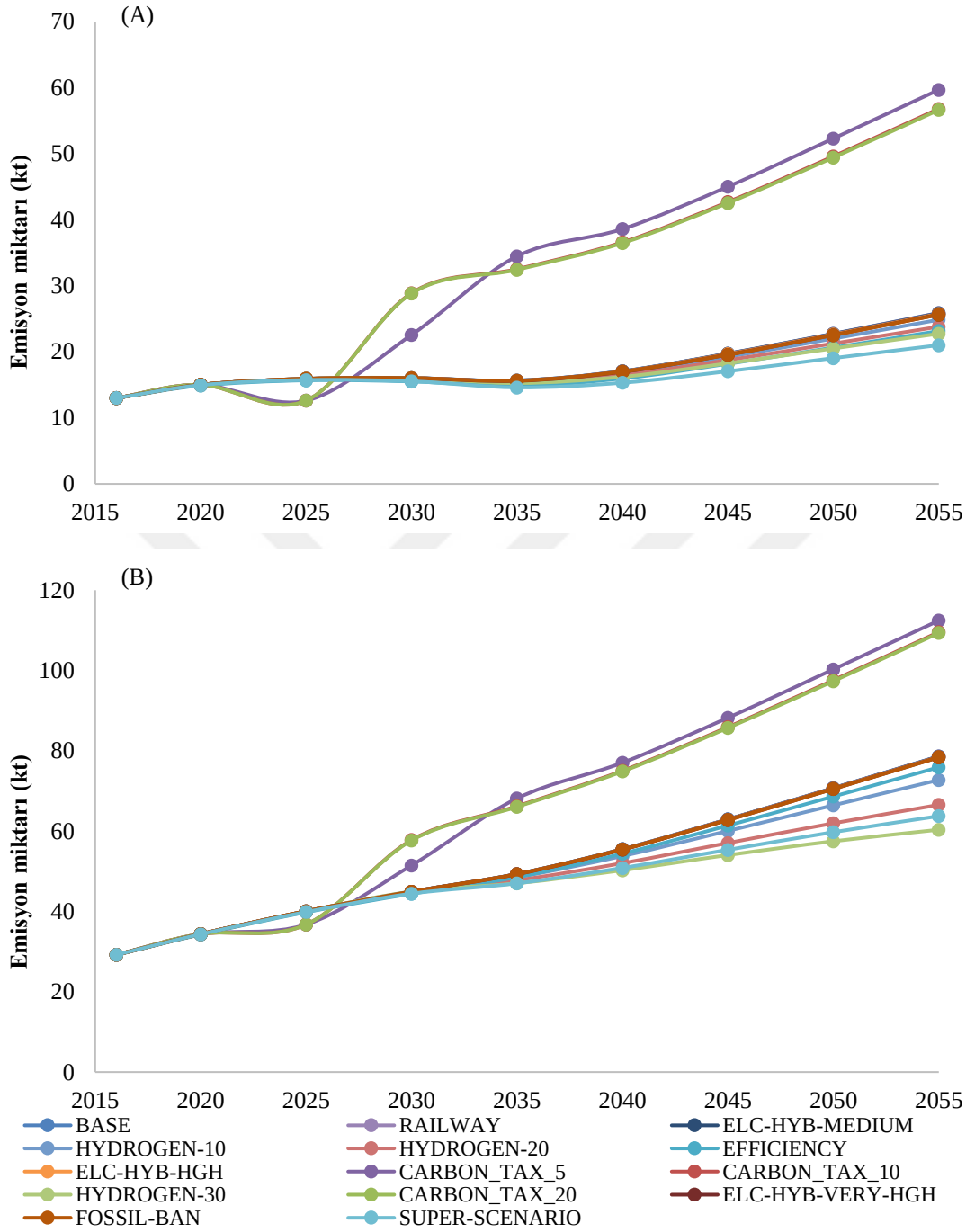
Şekil 8.39 : CO emisyonları, (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

Diğer bir kirlenici olan SO₂ parametresine ait sonuçlar Şekil 8.40'da verilmiştir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durum için en yüksek emisyon azaltım oranı %5 ile toplu önlem senaryosu ve HYDROGEN-30 senaryolarında gerçekleşmiştir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda ise en yüksek emisyon azaltım oranı %11 ile HYDROGEN-30 ve ardından %8 ile toplu önlem senaryosunda gerçekleşmiştir.



Şekil 8.40 : SO₂ emisyonları, (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

Uçucu organik bileşiklere ilişkin model sonuçları Şekil 8.41’de verilmiştir.



Şekil 8.41 : Uçucu organik bileşik emisyonları, (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

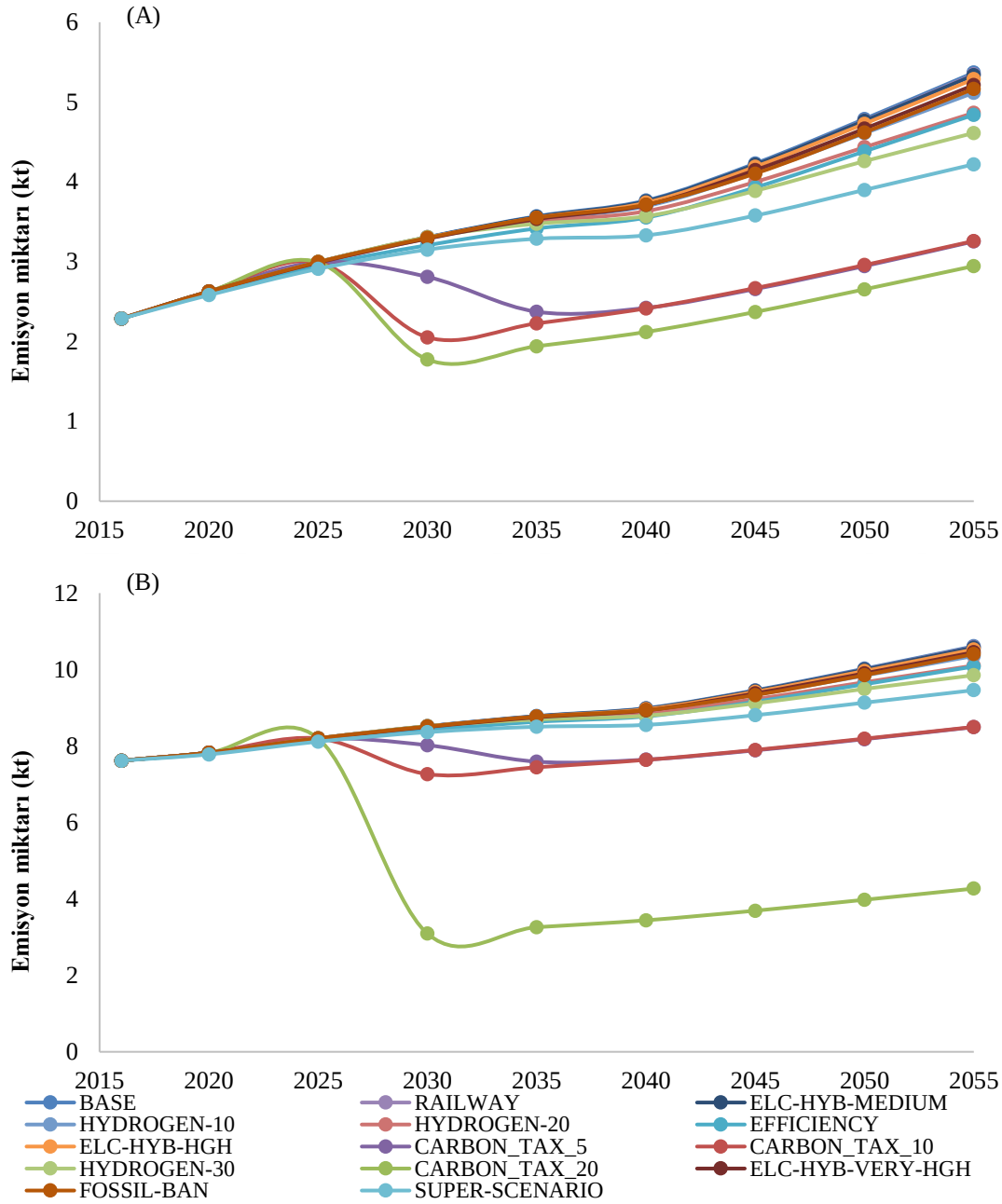
Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği ve edildiği her iki durum için de uçucu organik bileşikler, karbon vergisi senaryolarında önemli derecede artış (yaklaşık %130 ve %40) göstermiştir. Bu durumun temel sebebi, sera gazı emisyonlarını azaltırken modelin CNG’ye de yönelmiş olması ve VOC emisyon

faktörü diğer yakıtlara oranla çok daha yüksek olan CNG tüketiminin karbon vergisi senaryolarında baz senaryoya oranla yaklaşık 6,2 kat daha fazla tüketilmiş olmasıdır.

Öte yandan, en yüksek emisyon azaltımı uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda %19 ile toplu önlem senaryosunda elde edilmiştir. Bu değeri sırasıyla %12 ile HYDROGEN-30 ve %11 ile verimlilik senaryoları izlemiştir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda ise en yüksek azaltım %23 ile HYDROGEN-30 senaryosunda gerçekleşmiş olup, bu değeri %19 ile toplu önlem senaryosu takip etmiştir.

Diğer bir kirletici olan partikül maddelere ilişkin sonuçlar Şekil 8.42’de verilmiştir.





Şekil 8.42 : PM emisyonları, (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği ve edildiği her iki durum için de en yüksek azaltımlar, karbon vergisi senaryolarında gerçekleşmiştir. Bu azaltım oranları, uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda %39-%45 ve dahil edildiği durumda %20-%60 arasında değişmektedir. Bu değerleri, toplu önlem senaryosu için sırasıyla %21 ve %11, HYDROGEN-30 senaryosu için ise %14 ve %7 azaltım oranları takip etmektedir.

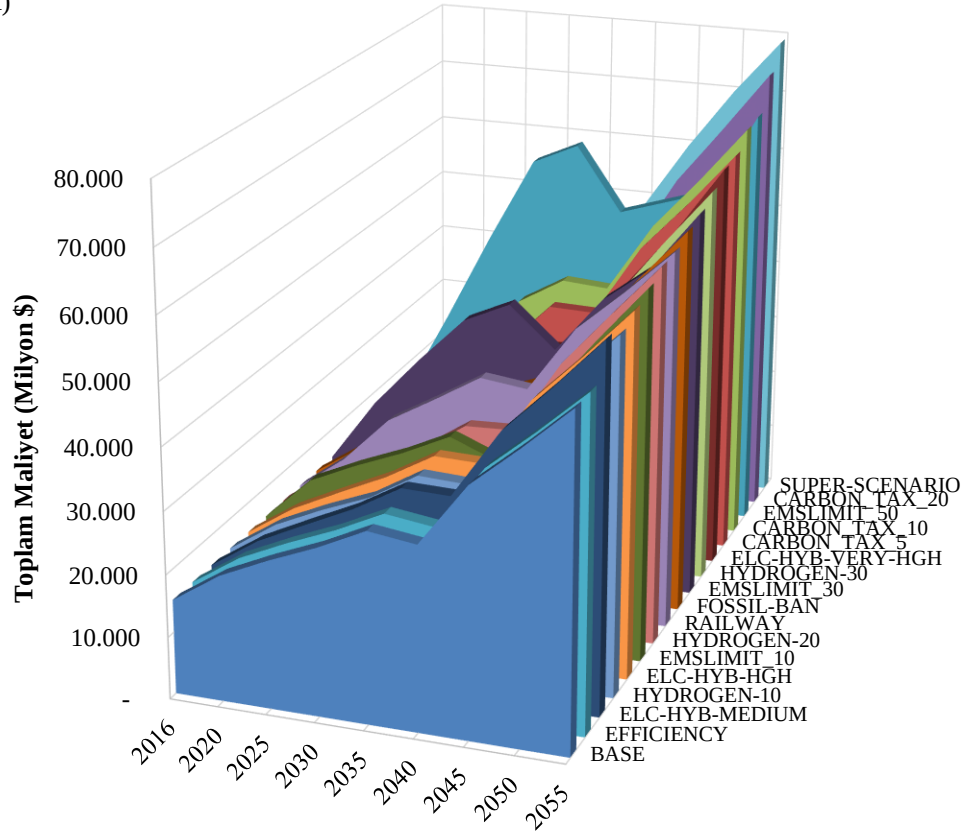
Yanardağ faaliyetleri, orman yangınları ve çöl tozları gibi doğal kaynakların yanı sıra ısınma, ulaşım ve sanayi gibi yapay kaynaklar hava kirliliğine sebep olarak doğanın dengesini bozmaktadır. Özellikle İstanbul gibi nüfus ve trafik yoğunluğunun fazla olduğu kentlerde ulaşım kaynaklı hava kirliliği önemli çevresel problemlere sebep olmaktadır. Büyük şehirlerde motorlu kara taşıtı kaynaklı hava kirliliğinin toplam kirlilikteki payının %70'in üzerinde olduğu ifade edilmektedir. Hava kirliliği akciğer hastalıkları, solunum fonksiyonlarında düşme, immunolojik hastalıklar, endokrin bozuklukları, kanser, gürültü ve stres gibi sağlık problemlerine sebep olmakta, ulaşım kaynaklı hava kirliliği özellikle trafik polisi, taksi şoförleri, gişe ve otopark çalışanları gibi meslek gruplarını etkilemektedir (Öztürk, 2017).

Tüm bu bilgiler ışığında çevre dostu yakıt ve teknolojilerin kullanımı, ulaşım kaynaklı hava kirliliğinin azaltılması açısından çok önemlidir. Ulaştırmanın verimli yöntemlere kaydırılması, sürdürülebilir ulaştırma teknolojisi, yakıt ve altyapısı uygulanması ulaştırmanın olumsuz etkilerinin azaltılması için AB politikası hedefleri arasında da yer almaktadır (AÇA, 2020).

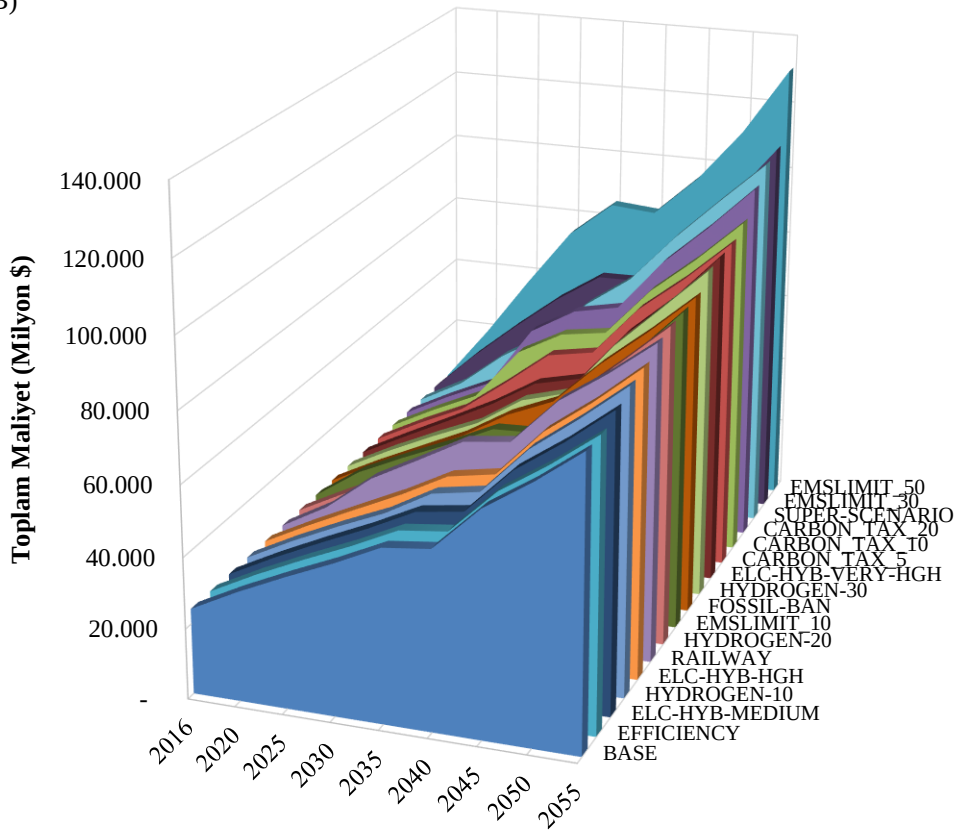
8.5 Maliyet

Model sonuçları ilk yatırım maliyeti ile işletme ve bakım maliyeti olarak ayrı ayrı elde edilmiştir. Detaylı maliyet tabloları EK D'de verilmektedir. Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda, işletme ve bakım maliyetleri ilk yatırım maliyetlerinin yaklaşık %13-%17'sini, dahil edildiği durumda ise %13-%19'unu oluşturmaktadır. Tüm senaryolara ilişkin toplam maliyet sonuçları Şekil 8.43'te gösterilmiştir. 2035-2040 yılları arasında düşük verimliliğe sahip, emisyon kontrol teknolojisi bulunmayan araçların veya Euro1-Euro4 araçların trafikten çekilmesi ile 2040 yılı maliyetlerinde düşüş yaşandığı ya da önemli derecede artış olmadığı görülmektedir.

(A)



(B)



Şekil 8.43 : Alternatif senaryoların toplam maliyet değişimi (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.

Emisyon salımlarına üst limit getirilmiş olan senaryolarda model o yıl içerisinde koyulan üst limiti aşmamak adına daha pahalı olan bir teknolojiye yönelebilmektedir. Bu sebeple, özellikle 2055 yılında %50 azaltım olacak şekilde en yüksek sera gazı emisyon üst limitinin getirildiği EMSLIMIT_50 senaryosu ile birlikte EMSLIMIT_10 ve EMSLIMIT_30 senaryolarında maliyet sonuçlarında bazı yıllarda ani dalgalanmalar mevcuttur.

Uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edilmediği durumda 2055 yılına gelindiğinde karbon vergisi senaryolarının maliyetleri baz senaryoya oranla %26 ile %42 arasında artış göstermiştir. Elektrikli ve hibrit araç senaryolarında bu maliyet artış oranı yaklaşık %4-%26 arasında, emisyon limit senaryolarında %12-%32 arasında ve hidrojen yakıtlı araç senaryolarında %7-%22 arasında değişmiştir. En yüksek emisyon azaltımının elde edildiği toplu önlem senaryosunda ise baz senaryoya oranla yaklaşık %49 oranında artış olmuştur. Bu senaryoda, sera gazı azaltım maliyeti 2025 yılında 16,6 M\$/kton CO₂e'den 2055 yılında 1,6 M\$/kton CO₂e'ye düşmüştür.

Öte yandan uluslararası havayolu ve denizyolu ulaşımının dahil edildiği durumda 2055 yılına gelindiğinde karbon vergisi senaryoları, elektrikli ve hibrit araç senaryoları, emisyon limit senaryoları ve hidrojen yakıtlı araç senaryolarına ilişkin maliyetler sırasıyla %17-%28, %3-%17, %11-%60 ve %6-%16 arasında artış göstermiştir. Toplu önlem senaryosunda ise baz senaryoya oranla yaklaşık %33 oranında artış olmuştur. Bu senaryoda, sera gazı azaltım maliyeti 2025 yılında 16,6 M\$/kton CO₂e'den 2055 yılında 1,2 M\$/kton CO₂e'ye düşmüştür.

Modelde elde edilen maliyet sonuçları, birim talebin karşılanması için gerekli maliyetler olup, doğrudan satınalma veya işletme ve bakım maliyetlerini yansıtmamaktadır.

8.6 Değerlendirme ve Öneriler

Ulaştırma sektörü, enerji yoğun fosil yakıtların ikame edilmesinin yüksek maliyetlerine bağlı olarak karbonsuzlaştırmanın önündeki kilit bir engel olarak tanımlanmaktadır. Bu sebeple, ulaştırma sektörü kaynaklı karbon salımının azaltılması, küresel ve ulusal hedeflere ulaşmak için önemi giderek artan bir bileşen haline gelmiştir. Mevcut durumda yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlı araçların günden güne daha verimli hale getirilmesi ile emisyonların bir miktar azaltılması mümkün olabilmekte ancak uzun vadeli hedeflere ulaşılmasına sınırlı katkı sağlamaktadır.

Bu doğrultuda, benzinli ve dizel araçlardan elektrikli araçlara geçiş potansiyel bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Düşük karbonlu bir ulaşım moduna geçişin anında gerçekleşmeyeceği ve mevcut durumda uygulanan herhangi bir politika veya teknolojik değişikliğin istenen etkiyi göstermesinin yıllar süreceği göz önünde bulundurularak ulaştırma sektöründeki elektrifikasyon sürecinin hızlandırılması gerekmektedir. Ayrıca, elektrikli araçlardan sağlanacak faydanın arttırılması için elektrik üretim prosesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının payının arttırılması kritiktir.

Petrol kökenli yakıtların çevreye verdiği zararların yanı sıra rezervlerinin de giderek azalması, son dönemlerde alternatif yakıtları da gündeme getirmiştir. En önemli alternatif yakıtlardan biri olarak ele alınan hidrojen yakıtı, fosil yakıtlı araçlara göre yüksek verime sahip olması, zararlı emisyonlara sebep olmaması ve yan ürün olarak sadece su üretmesi sebebiyle karbon emisyonlarında önemli bir azalma gerçekleştirme potansiyeline sahiptir. Geleceğin teknolojisi olarak görülen hidrojen yakıtlı araçların mevcut durumda önündeki en büyük engel yüksek maliyete sahip olmalarıdır. Ancak, zamanla maliyetlerde yaşanacak düşüşle yaygınlaşması beklenmektedir.

Öte yandan, karbon vergileri sera gazı emisyonlarını azaltmada maliyet etkin bir yol olarak düşünülse de daha popüler hale gelmesi ve etkili bir politika seçeneği olarak uygulanması için çevre bilincinin artması önemlidir.

Bu çalışma kapsamında, İstanbul için ulaşım sektörü incelenmiş ve farklı senaryoların sera gazı emisyon azaltımını etkileyip etkilemediği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, yukarıda da bahsedilmiş olan tüm uygulamalar etkilidir. Verimlilik

senaryosu, raylı ulaşım senaryosu, yüksek büyüme elektrikli ve hibrit araçlar senaryosu, 2030 yılı itibariyle dizel ve benzinli araçların satışının yasaklandığı senaryo ile 2035 yılı itibariyle hidrojen yakıtlı uçak, otomobil, otobüs ve kamyon teknolojilerinin kendi sınıflarında talebin %20'sini karşıladıkları senaryonun birlikte ele alındığı toplu önlem senaryosunda 2055 yılında yakıt tüketiminde uluslararası havayolu ve denizyolu taşımacılığının dahil edilmediği durumda %28, dahil edildiği durumda ise %16 oranında bir azaltım söz konusudur. Sera gazı azaltım oranları ise 2055 yılı için uluslararası havayolu ve denizyolu taşımacılığının dahil edilmediği durumda yaklaşık %43, dahil edildiği durumda ise %32 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar senaryoların tekil azaltım oranları ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Özellikle, ulusal sera gazı emisyon envanterlerine dahil edilmeyen uluslararası havayolu ulaşımının ciddi derecede sera gazı salımına sebep olduğu görülmüştür. Bu sebeple, küresel sıcaklık artışı hedeflerine ulaşılması kapsamında havacılık sektörüne ait düzenlemelerin dikkatle değerlendirilmesi gerektiği değerlendirilmektedir.

Öte yandan, bu azaltım oranlarının belirlenmesinde teknoloji maliyetleri etkin rol oynamaktadır. TIMES Modeli amaç fonksiyonunu (maliyet minimizasyonu), model kısıtlarını ve diğer model girdilerini (teknoloji ömrü, verimlilik vb.) göz önünde bulundurarak optimum sonucu vermektedir. Teknolojilerin kullanımı veya emisyonlara yönelik herhangi bir kısıt tanımlanmadığı takdirde talebi karşılayacak en uygun maliyetli teknoloji tercih edilecektir. Bir emisyon üst sınırı tanımlanması durumunda modelin, emisyon kısıtını göz önüne alarak daha verimli ve maliyetli bir teknolojiye yönelmesi beklenmektedir. Maliyet sonuçlarına, toplu önlem senaryosunda yukarıda belirtilen azaltım oranlarına karşılık 2055 yılında baz senaryoya oranla uluslararası havayolu ve denizyolu taşımacılığının dahil edilmediği durumda yaklaşık %49, dahil edildiği durumda ise %33 oranında artış gerçekleşmiştir. Ancak, 2055 yılına gelindiğinde birim sera gazı azaltım maliyetinde %90'ın üzerinde düşüş olmuştur. Yeni teknolojilerin mevcut durumda oldukça yüksek olan maliyetleri yıllara sari olarak azalmaktadır. 2015-2050 yıllarını kapsayan ve Türkiye geneli için yapılan başka bir çalışmada da senaryolar farklılık göstermekle birlikte benzer şekilde 2015-2030 yılları arası daha yüksek, sonrasında daha düşük bir oran ile artış gösteren maliyetler elde edilmiştir (Sarica ve diğ., 2019).

Çalışma sonuçlarına göre ulaşım sektöründe fosil yakıt tüketim oranı alınan önlemler ile 2055 yılında azalıyor olsa bile hala baskın rol oynamaktadır. 2050 yılına kadar

enerji görünümünün analiz edildiği ve Kanada’da yürütülen bir çalışmada TIMES-Kanada modeli tarım, hizmet, endüstri, konut ve ulaştırma sektörlerini içermekte olup, 2007 yılına göre kalibre edilmiş ve 2007-2050 yılları için çalıştırılmıştır. Çalışmada da aynı şekilde oran olarak azalmasına rağmen (2007’de %43 ve 2050’de %29) petrol ürünlerinin ulaştırma sektöründeki dizel ve benzin üretiminden dolayı hakim olmaya devam edeceği sonucuna varılmıştır (Vaillancourt ve diğ., 2014).

Bu çalışma ile ayrıca, enerji üretiminde yenilenebilir enerji kullanımının önemi ortaya konmuştur. Elektrik üretim emisyonları da toplam emisyonlar içerisinde dahil edildiğinde sera gazı emisyonu azaltım oranlarında düşüş yaşanmaktadır.

Gelişmekte olan ülkelerden Malezya’da gerçekleştirilen bir çalışmada, içten yanmalı, hibrit ve elektrikli araçlar için kuyudan tekerleğe yaşam döngüsü analizi ile potansiyel SGE azaltımının hesaplanması amaçlanmıştır. Sonuçlar tam elektrikli araçların aynı mesafede hibrit araçlara göre %7 daha fazla, içten yanmalı araçlara göre %19 daha az sera gazı üreteceğini göstermiştir. Malezya’nın elektrik üretiminin hala büyük ölçüde fosil yakıtların hakimiyetinde olması nedeniyle elektrikli araçlara hazır olmadığı, elektrikli araçların kullanımı yoluyla üretilen sera gazı emisyonlarının önemli düzeyde olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, elektrikli araçların iklim değişikliğine ve küresel ısınmanın azaltılmasına yönelik faydasını arttırmak için, ulusal şebekenin daha yeşil kaynaklara yönelik geliştirilmesi için büyük çaplı modernizasyon ve dönüşüm gerçekleştirilmelidir (Onn ve diğ., 2018).

Kanada’nın Alberta eyaletinde yapılan farklı bir çalışmada, 2030 yılı için taahhüt edilen azaltım hedefinin yaklaşık üçte birinin, mevcut durumda kömürle çalışan elektrik üretim santrallerinde sera gazı emisyonlarının azaltılması ve elektrikli araçların kullanılması yoluyla gerçekleştirilebileceği ortaya konmuştur (Doluweera ve diğ., 2020). Bu bağlamda özellikle elektrik üretiminde fosil yakıtlara bağımlı olan ülkelerde temiz enerjiye dönüşüme hız kazandırılması gerekmektedir.

Ulaştırma sektörünün iklim değişikliğine olan etkisinin azaltılması için ulaşım araçlarının verimli teknolojilerle değiştirilmesi ve daha fazla emisyon azaltımı için çevre dostu yakıtlara geçilmesi önemli görülmektedir. Ülkemizde halihazırda sınırlı oranda kullanılmakta olan elektrikli ve hibrit araçların yaygınlaşması etkili bir emisyon azaltım seçeneği olarak düşünülmektedir. Bu kapsamda, gerekli olan şarj

istasyonu altyapısı da hızlı bir şekilde gelişmektedir. Tam elektrikli araçlara geçiş sürecinde hibrit araçların kullanımının artırılması ve bu tür araçların üretiminin gerçekleştirilerek yaygınlaştırılması da önemli bir husus olarak değerlendirilmektedir. Diğer yandan fosil yakıtlı araçların satışının yasaklanması ve zamanla trafikten çekilmesi, kısa vadede belirli bölgelere fosil yakıtlı araç girişlerinin yasaklanması etkili bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

Halihazırda özellikle günün belirli saatlerinde yaşanan yoğun trafik sıkışıklığı da üzerinde durulması gereken hususlardan bir tanesi olup, sürüş koşullarının değişmesi sebebiyle hava kirletici emisyonların büyük oranda artmasına sebep olmaktadır. Bu kapsamda, toplu taşımanın yaygınlaştırılmasına ek olarak özellikle bisiklet yollarının yapılması ve Amsterdam, Kopenhag ve Münster gibi şehirlerde olduğu gibi bisiklet kullanımının yaygınlaştırılması hem trafik yoğunluğunun azaltılmasına, hem de trafik kaynaklı emisyonların azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, denizyolu ulaşımını da içerecek şekilde raylı sisteme ek olarak diğer toplu taşıma araçlarında da elektrik ve hidrojen gibi temiz yakıtlara geçişin mevcut emisyonların azaltılmasına önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Son olarak, ulaştırma sektörü bazında İstanbul için gerçekleştirilmiş olan bu çalışmanın önemli çıktılar oluşturduğu düşünülmekte ve benzer çalışmalara öncülük etmesi beklenmektedir. Bu doğrultuda, yürütülecek çalışmalar için en önemli iş adımlarından birinin verilerin derlenmesi olduğu unutulmamalıdır. Ulaştırma sektörü için değerlendirildiğinde detaylı teknoloji verilerini içeren veritabanlarının oluşturulması ve özellikle ülkemize özgü emisyon faktörlerinin gerçek koşullarda belirlenmesi, çalışmaların sonuçlarının doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır.



KAYNAKLAR

- AÇA.** (2020). *Ulaşım. 12 Temmuz 2021 tarihinde Avrupa Çevre Ajansı: <https://www.eea.europa.eu/tr/themes/transport/intro> adresinden alındı*
- Alemdar, F.** (2010). *Technologically detailed modeling and analysis of industrial energy use and CO2 emissions in Turkey within the framework of a MARKAL based bottom-up national energy model.* (Yüksek Lisans tezi). Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Amorim, F., Pina, A., Gerbelová, H., da Silva, P. P., Vasconcelos, J., & Martins, V.** (2014). Electricity decarbonisation pathways for 2050 in Portugal: A TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) based approach in closed versus open systems modelling, *Energy*, 69, 104-112.
- Balı, S., & Yaylı, G.** (2019). Karbon Vergisinin Türkiye’de Uygulanabilirliği. *Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi*, 54/1, 302-319.
- Birol, B.** (2014). *Kentiçi raylı sistemler ve metrobüs işletme maliyeti değerlendirilmesi :İstanbul örneği.* (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- CarbonBrief.** (2019). *Global emissions. 8 Nisan 2021 tarihinde CarbonBrief Clear on Climate: <https://www.carbonbrief.org/unep-1-5c-climate-target-slipping-out-of-reach> adresinden alındı*
- Chang, C.-C., & Chung, C.-L.** (2018). Greenhouse gas mitigation policies in Taiwan's road transportation sectors. *Energy Policy*, 123, 299–307.
- Choi, W., & Song, H.** (2018). Well-to-wheel greenhouse gas emissions of battery electric vehicles in countries dependent on the import of fuels through maritime transportation: A South Korean case study. *Applied Energy*, 230, 135-147.
- CleanTechnica.** (2021). *31 Countries, States, And Cities Have Gas/Diesel Car Bans In Place. 18 Mayıs 2021 tarihinde <https://cleantechnica.com/2021/01/02/31-countries-states-and-cities-have-ice-bans-in-place/> adresinden alındı*
- Coşaran, Ç.** (2018). *Otobüs ve tramvay benzeri sistemlerin incelenip işletme maliyetlerinin karşılaştırılması.* (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cuci, Y., & Ergün Polat, E.** (2015). Gaziantep’in Trafik Kaynaklı Hava Kirliliğinin Belirlenmesi. *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(2).
- CW.** (2018). *Historical GHG Emissions. 18 Mayıs 2021 tarihinde Climate Watch Data: https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2018&start_year=1990 adresinden alındı*

- Çakmak, E., Doğan, T., & Hilmioğlu, B.** (2017). İklim değişikliği sürecinde Paris Anlaşması'nın rolü ve Türkiye'nin konumu. *VII. Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu*. Antalya, Türkiye:1-3 Kasım.
- Çoban, C., & Turan, E.** (2018). Marmara Denizinde Ro-Ro Taşımacılığı Birim Maliyetlerinin İncelenmesi: Ambarlı – Bandırma Hattı Örneği. *DergiPark*, 211, 61-78.
- ÇŞB.** (2010). *Türkiye İklim Değişikliği Stratejisi 2010-2023*. Ankara: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- ÇŞB.** (2011). *Türkiye Cumhuriyeti İklim Değişikliği Eylem Planı 2011-2023*. Ankara: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- ÇŞB.** (2015). *Türkiye Cumhuriyeti Niye Edilen Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkı*. Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- ÇŞB.** (2017). *Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi. 18 Eylül 2017 tarihinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı: <http://www.csb.gov.tr/projeler/iklim/index.php?Sayfa=sayfa&Tur=webmenu&Id=12426> adresinden alındı*
- ÇŞB.** (2019). *2020-2023 Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planı*. Ankara: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- ÇŞB.** (2021). *İklim Değişikliği Uyum Konusunda Kurumsal Kapasitenin Geliştirilmesi Eğitimi Projesi – Modül 1*. Ankara: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı-Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü.
- Dal, E.** (2017). *Türkiye'de elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teknolojik, politik ve çevresel kısıtlamalar ile analizi*. (Yüksek Lisans tezi). Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- DB.** (2021). *BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi. 5 Nisan 2021 tarihinde Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı: <https://www.mfa.gov.tr/bm-iklim-degisikligi-cerceve-sozlesmesi.tr.mfa> adresinden alındı*
- Demircan, M., Demir, Ö., Atay, H., Eskioğlu, O., Yazıcı, B., Gürkan, H., Tuvan, A. & Akçakaya, A.** (2014). Türkiye’de Yeni Senaryolara Göre İklim Değişikliği Projeksiyonları. *Meteoroloji Genel Müdürlüğü*.
- Demircan, M., Gürkan, H., Arabacı, H., & Coşkun, M.** (2017). *Türkiye İçin İklim Değişikliği Projeksiyonları. 16. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*. Ankara: TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası.
- Deniz, O.** (2007). *İstanbul Boğaz Köprüleri'nde taşıtların yarattığı kirliliğin Copert III ve Mobile 6 modelleri ile hesaplanması*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- DGM.** (2021). *Denizcilik İstatistikleri. Mayıs 2021 tarihinde T.C.Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı-Denizcilik Genel Müdürlüğü: <https://denizcilikistatistikleri.uab.gov.tr/> adresinden alındı*
- Dhar, S., Pathak, M., & Shukla, P.** (2018). Transformation of India's transport sector under global warming of 2 °C and 1.5 °C scenario. *Journal of Cleaner Production*,172, 417-427.

- DieselNet.** (2015). EU: *Low Emission Zones (LEZ)*. 9 Mayıs 2021 tarihinde [https://dieselnet.com/standards/eu/lez.php#:~:text=Low%20Emission%20Zones%20\(LEZ\)%20are,the%20EU%20Air%20Quality%20Standards. adresinden alındı](https://dieselnet.com/standards/eu/lez.php#:~:text=Low%20Emission%20Zones%20(LEZ)%20are,the%20EU%20Air%20Quality%20Standards. adresinden alındı)
- DLH.** (2015). *DLH Ulaşım ve Fizibilite Etüdü Teknik Şartnamesi*. Ankara: Demiryollar, Limanlar ve Hava Meydanları inşaatı Genel Müdürlüğü
- Doluweera, G., Hahn, F., Bergerson, J., & Pruckner, M.** (2020). A scenario-based study on the impacts of electric vehicles on energy consumption and sustainability in Alberta. *Applied Energy*,268, 114961.
- EC.** (2021). *Fluorinated greenhouse gases*. 23 Nisan 2021 tarihinde European Commission: https://ec.europa.eu/clima/policies/f-gas_en#:~:text=F%2Dgases%20are%20often%20used,their%20emissions%20are%20rising%20strongly. adresinden alındı
- EİGM.** (2021). *Enerji Denge Tabloları*. 21 Mart 2021 tarihinde <http://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Denge-Tablolari/Denge-Tablolari adresinden alındı>
- EMEP.** (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019-Technical guidance to prepare national emission inventories1994-2019*. Luxembourg: European Environment Agency.
- Emisia.** (2018). *Copert-The industry standard emissions calculator*. 28 Haziran 2019 tarihinde [http://www.emisia.com/utilities/copert/ adresinden alındı](http://www.emisia.com/utilities/copert/)
- EnergyVille.** (2017). *Energy transition in Belgium – Choices and costs*. <https://www.energyville.be/energy-transition-belgium-choices-and-costs adresinden alındı>
- EPA.** (2016). *SmartWay Vehicle List*. 5 Ocak 2020 tarihinde [FuelEconomy: https://www.fueleconomy.gov/feg/download.shtml](https://www.fueleconomy.gov/feg/download.shtml) adresinden alındı
- EPA.** (2018). *MOVES2014a: Latest Version of MOrtor Vehicle Emission Simulator (MOVES)*. 28 Haziran 2019 tarihinde United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/moves/moves2014a-latest-version-motor-vehicle-emission-simulator-moves> adresinden alındı
- EPA.** (2021). *Greenhouse Gas (GHG) Emissions*. 23Nisan 2021 tarihinde United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/ghgemissions> adresinden alındı
- EPDK.** (2019). 18 Mayıs 2019 tarihinde *Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu*: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/DownloadDocument?id=xlTv+9O7zFc> = adresinden alındı
- Esenarro, D., Rodriguez, C., Alfaro, O., Paredes, P., & Amaya, P.** (2020). Mitigation of Greenhouse Gases (CO₂) through the use of the Hybrid Engine (Hydrogen Fuel). *Test Engineering and Management*, 83, 13448 - 13452.
- ETKB.** (2017). *Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023*. Ankara: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı .

- ETSAP.** (2017). *Overview of TIMES Modelling Tool*. International Energy Agency. 10 Haziran 2017 tarihinde The Energy Technology Systems Analysis Program (IEA-ETSAP): <http://www.iea-etsap.org/web/Times.asp> adresinden alındı
- Eurostat.** (2021). *Passenger cars per 1000 inhabitants*. 12 Mayıs 2021 tarihinde http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=road_eqs_c_arhab&lang=en adresinden alındı
- FCH, & Clean Sky 2.** (2020). *Hydrogen-powered aviation-A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*. Luxembourg: European Union.
- Ghadiri, Z., Rashidi, Y., & Broomandi, P.** (2017). Evaluation Euro IV of effectiveness in transportation systems of Tehran on air quality: Application of IVE model. *Pollution*, 3, 639-653.
- Gurz, M., Baltacioglu, E., Hames, Y., & Kaya, K.** (2017). The meeting of hydrogen and automotive: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 23334-23346.
- Hill, G., Heidrich, O., Creutzig, F., & Blythe, P.** (2019). The role of electric vehicles in near-term mitigation pathways and achieving the UK's carbon budget. *Applied Energy*, 251, 113111. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.107>.
- Hou, F., Chen, X., Chen, X., Yang, F., Ma, Z., Zhang, S., Liu, C., Zhao, Y. & Guo, F.** (2021). Comprehensive analysis method of determining global long-term GHG mitigation potential of passenger battery electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125137. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125137>.
- İBB.** (2011). *İstanbul Metropolitan Alanı Kentsel Ulaşım Planı*. İstanbul: İstanbul Büyükşehir Belediyesi.
- İBB.** (2018). *İstanbul İklim Değişikliği Eylem Planı Final Raporu*. İstanbul: İstanbul Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma ve Kontrol Daire Başkanlığı.
- İBB.** (2018). *İstanbul Yıllık Ulaşım Raporu 2017*. İstanbul: İstanbul Büyükşehir Belediyesi.
- İBB.** (2021). *Veri Setleri-Mobilite*. 12 Mayıs 2021 tarihinde İBB Açık Veri Portalı: <https://data.ibb.gov.tr/dataset?groups=ulasim-hizmetleri> adresinden alındı
- IEA.** (2021). *IEA World Energy Balances*. 12 Mayıs 2021 tarihinde International Energy Agency: <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/world-energy-balances-and-statistics> adresinden alındı
- İETT.** (2021). *İstanbul'da Toplu Ulaşım*. 12 Mayıs 2021 tarihinde İETT: <https://iett.istanbul.tr/main/pages/istanbulda-toplu-ulasim/95> adresinden alındı
- IFE.** (2013). *TIMES-Norway Model Documentation*. Kjeller: Institute for Energy Technology.

- İklim.İstanbul.** (2021). *İstanbul 2019 Yılı Sera Gazı Envanteri Sektörel Dağılımı*. 15 Mayıs 2021 tarihinde iklim.istanbul: [https://www.iklim.istanbul/genel-tr/13861/adresinden alındı](https://www.iklim.istanbul/genel-tr/13861/adresinden%20alindi)
- IPCC.** (1996). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC.** (1996). *The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA and Melbourne, Australia: Cambridge University Press.
- IPCC.** (2003). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories-Aircraft Emissions*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC.** (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC.** (2007). *The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press.
- IPCC.** (2013). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.: Cambridge University Press.
- IPCC.** (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ISSRC.** (2018). *International Vehicle Emissions Model*. 28 Haziran 2018 tarihinde <http://www.issrc.org/ive/> adresinden alındı
- Istairport.** (2021). *Coğrafi Avantaj*. 15 Mayıs 2021 tarihinde İstanbul Airport: <https://www.istairport.com/tr> adresinden alındı
- Işık, M.** (2016). *Energy economy and environment integrated large scale modeling and analysis of the Turkish energy system*. (Doktora tezi). Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kalajahi, M., Khazini, L., Rashidi , Y., & Heris, S.** (2020). Development of Reduction Scenarios Based on Urban Emission Estimation and Dispersion of Exhaust Pollutants from Light Duty Public Transport: Case of Tabriz, Iran. *Emission Control Science and Technology*, 6, 86-104.
- Kanitkar, T.** (2019). Review of Energy-Economy-Environment Models. An Integrated Framework for Energy-Economy-Emissions Modeling. *SpringerBriefs in Environmental Science*. Springer, Cham. 7-26.
- Kara, N.** (2013). *Determination and modeling of emission factors using a highway tunnel*. (Yüksek Lisans tezi). Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

- Karakaya, E.** (2008). Küresel Isınma Ve Kyoto Protokolü: İklim Değişikliğinin Bilimsel Ekonomik ve Politik Analizi. *Enerji-Ekonomi-Çevre Modellemesi Bağlamında İklim Değişikliği Modelleri:Literatür ve Türkiye Üzerine Modellerin Analizi.* (s. 333-364). https://www.researchgate.net/publication/280611832_Enerji-Ekonomi-Cevre_Modellemesi_Baglaminda_Iklim_Degisikligi_Modelleri_Literatur_ve_Turkiye_Uzerine_Modellerin_Analizi adresinden alındı.
- Keller, A., Karpukhin, K., Kolbasov, A., & Kozlov, V.** (2021). Analysis of hydrogen use as an energy carrier in transport. *Materials Science and Engineering*, 1159.
- Kemfert , C.** (2003). Applied economic- environment- energy modeling for quantitative impact assessment. *Proceedings of the EU Advanced Summer Course in Integrated Assessment methodology* (s. 91-103).
- KGM.** (2017). *Otoyollar ve Devlet Yollarının Trafik Dilimlerine Göre Yıllık Ortalama Günlük Trafik Değerleri ve Ulaşım Bilgileri Raporu.* Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü-Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı.
- KGM.** (2021). *İstatistikler-Devlet ve İl Yolları Envanteri. 28 Mayıs 2021 tarihinde Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü: https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Istatistikler/DevletveIlyolEnvanteri.aspx* adresinden alındı
- Kim, K. D., Ko, H. K., Lee, T., & Kim, D. S.** (2011). Comparison of Greenhouse Gas Emissions from Road Transportation of Local Government by Calculation Methods. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(4). DOI:10.5572/KOSAE.2011.27.4.405.
- Kumbaroğlu, G., Or, İ., Işık, M.** (2017). Karbon Vergisi ile Sera Gazı Emisyonlarının Azaltımı: Türkiye Vakası. *Uluslararası İlişkiler*,14, 149-174.
- LEAP.** (2021). *LEAP-Introduction. 19 Mayıs 2021 tarihinde LEAP: https://leap.sei.org/default.asp?action=introduction* adresinden alındı
- Lents, J., Canada, M., Nickila, N., & Tolvett, S.** (2007). *Measurement of In-Use Passenger Vehicle Emissions in Almaty, Kazakhstan.* ISSRC.
- Lents, J., Nickila, N., Davis, N., Canada, M., Martinez, H., Osses, M. & Tolvett, S.** (2007). *A Study of the Emissions from Diesel Vehicles Operating in Sao Paulo, Brazil and in Mexico City, Mexico.* ISSRC.
- Lents, J., Unal, A., Mangir, N., Osses, M., Tolvett, S., & Yunusoglu, Ö.** (2007). *A Study of the Emissions from Diesel Vehicles Operating in Istanbul, Turkey.* ISSRC.
- Loulou, R., Goldstein, G., Kanudia, A., Lettila, A., & Remme, U.** (2016). *Documentation for the TIMES Model-Part I. Energy Technology Systems Analysis Programme.*
- Özalp, M., Öcalır Akünel, E.V.** (2008). Türkiye'deki Kentiçi Ulaşım Planlaması Çalışmalarının Değerlendirilmesi. *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi*,25, 71-97.

- Mann, M. E.** (2021). *Greenhouse gas*. 23 Nisan 2021 tarihinde Britannica: <https://www.britannica.com/science/greenhouse-gas> adresinden alındı
- Marmaray.** (2021). *Marmaray Hakkında*. 30 Ocak 2021 tarihinde Marmaray: <http://marmaray.gov.tr/marmaray-hakkinda/> adresinden alındı
- Martin, D., & Smith, N.** (2003). *The Route to Cleaner Buses-A guide to operating cleaner, low carbon buses*. Energy Saving Trust
- Märtz, A., Plötz, P., & Jochem, P.** (2021). Global perspective on CO₂ emissions of electric vehicles. *Environmental Research Letters*, 16, 054043.
- Mengi, O. Ö.** (2018). Dizel Bir Aracın Elektrikli Araca Dönüşüm Performansının Değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 175-182.
- Metroİstanbul.** (2019). *Yolcu İstatistikleri-Hat Bazlı Yıllık Yolcu Sayıları*. 8 Aralık 2020 tarihinde Metro İstanbul: <https://www.metro.istanbul/yolcuizmetleri/yolcuistatistikleri> adresinden alınmıştır
- Metroİstanbul.** (2020). *2019 Faaliyet Raporu*. İstanbul: Metro İstanbul.
- MFA.** (2021). *Türk Boğazları*. 8 Mayıs 2021 tarihinde T.C. Dışişleri Bakanlığı: <https://www.mfa.gov.tr/turk-bogazlari.tr.mfa> adresinden alındı
- MGM.** (2013). *Yeni Senaryolarla Türkiye İçin İklim Değişikliği Projeksiyonları*. Ankara: Meteoroloji Genel Müdürlüğü.
- MGM.** (2015). *Yeni Senaryolar ile Türkiye İklim Projeksiyonları ve İklim Değişikliği*. Ankara: Meteoroloji Genel Müdürlüğü.
- NASA.** (2021). *Facts-Vital Signs*. 23 Nisan 2021 tarihinde Global Climate Change-Vital Signs of the Planet: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/> adresinden alındı
- Obaid, M., Torok, A., & Ortega, J.** (2021). A Comprehensive Emissions Model Combining Autonomous Vehicles with Park and Ride and Electric Vehicle Transportation Policies. *Sustainability*, 13(9), 4653; <https://doi.org/10.3390/su13094653>.
- OECD.** (2020). *Real GDP long-term forecast*. 10 Ocak 2020 tarihinde The Organisation for Economic Co-operation and Development: <https://data.oecd.org/gdp/real-gdp-long-term-forecast.htm#indicator-chart> adresinden alındı
- Onn, C. C., Mohd, N. S., Yuen, C. W., Loo, S. C., Koting, S., Rashid, A. F. A., Karim, M.R., Yusoff, S.** (2018). Greenhouse gas emissions associated with electric vehicle charging: The impact of electricity generation mix in a developing country. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 64, 15-22.
- OPET.** (2018). *Fuel-Oil Güvenlik Bilgi Formu*. 28 Mayıs 2019 tarihinde https://www.opet.com.tr/Files/PDF/urun/OPET-GBF-05_5-FUEL-OIL-GUVENLIK-BILGI-FORMU.pdf adresinden alındı

- Ölçer, F.** (2017). *Raylı Sistemlere Elektrikli Otobüs Alternatifi-Elektrikli Otobüsler Maliyeti Düşürdü.* 5 Ocak 2020 tarihinde https://www.emo.org.tr/ekler/0eeea44ff2c7982_ek.pdf?dergi=1104 adresinden alındı
- Özen, M.** (2013). *Estimation of road freight transportation emissions in Turkey.* (Doktora tezi). Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Öztürk, M.** (2017). *Ulaşım Kaynaklı Hava Kirliliğinin Sağlık Üzerine Etkileri.* Ankara.
- Pekin, M.** (2006). *Ulaştırma sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonları.* (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Plötz, P., Funke, S., & Wietschel, M.** (2017). CO₂ Mitigation Potential of Plug-in Hybrid Electric Vehicles larger than expected. *Scientific Reports*, 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16684-9>.
- Rabbi, E., Tomhave, D., Alrasheed, A., & Yang, C.** (2016). Fuel consumption model for optimal transit bus assignment of gasoline, diesel and hybrid diesel-electric buses to each service route. *CSME International Congress 2016. Proceedings of The Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress.* Kelowna, BC, Canada, June 26-29.
- RFF.** (2020). *Carbon Pricing 202: Pricing Carbon in the Transportation Sector.* 9 Mayıs 2021 tarihinde *Resources for the Future:* [https://www.rff.org/publications/explainers/carbon-pricing-202-pricing-carbon-transportation-sector/#:~:text=When%20covering%20the%20transportation%20sector,\(such%20as%20public%20transit\).](https://www.rff.org/publications/explainers/carbon-pricing-202-pricing-carbon-transportation-sector/#:~:text=When%20covering%20the%20transportation%20sector,(such%20as%20public%20transit).) adresinden alındı
- Saatçioğlu, T.** (2010). *Marmaray Projesi ile trafikten çekilecek otomobil sayısının İstanbul'da hava kalitesine yapacağı etkinin IVE model ile tespiti.* (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sağlam, M.** (2010). *Establishing mitigation strategies for energy related emissions for Turkey using the markal family of models.* (Doktora tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Salvucci, R., Gargiulo, M., & Karlsson, K.** (2019). The role of modal shift in decarbonising the Scandinavian transport sector: Applying substitution elasticities in TIMES-Nordic. *Applied Energy*, 253, 113593.
- Sarıca, K., Tokel, A., & Ersoy, E.** (2019). *Düşük Karbonlu Kalkınma için Çözümsel Tabanlı Strateji ve Eylem Geliştirilmesi Teknik Destek Projesi-Faaliyet 3.1 kapsamında analiz edilen emisyon azaltım eylemlerinin finansal değerlendirmesi.* Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
- SBB.** (2019). *On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023).* Ankara: Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı.
- Shi, J., Chen, W., & Yin, X.** (2016). Modelling building's decarbonization with application of China TIMES model. *Applied Energy*, 162, 1303-1312.

- SHURA.** (2019). *Türkiye ulaştırma sektörünün. İstanbul: SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi dönüşümü: Elektrikli araçların Türkiye dağıtım şebekesine etkileri.* İstanbul: SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi.
- Soruşbay, C., & Karahan, Ş.** (2009). *Ulaştırma Sektöründe Sera Gazı Azaltımı Proje Sonuç Raporu.* TÜBİTAK.
- Sulukan, E.** (2010). *Establishing energy efficient utilization and cost-effective energy technologies selection strategies for Turkey using markal family of models.* (Doktora tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sun, D., Zhang, Y., Xue, R., & Zhang, Y.** (2017). Modeling carbon emissions from urban traffic system using mobile monitoring. *Science of The Total Environment*, 599-600, 944-951.
- TCDD.** (2018). *2018 İstatistik Yıllığı.* Ankara: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Taşımacılık A.Ş. Genel Müdürlüğü.
- TCDD.** (2019). *2019 Faaliyet Raporu.* Ankara: TCDD Taşımacılık A.Ş. .
- TEHAD.** (2021). *5 Aralık 2020 tarihinde Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçlar Derneği: <https://www.tehad.org/> adresinden alındı*
- Tetik, E.** (2017). *Turkish electricity sector: A bottom-up approach.* (Yüksek Lisans tezi). Işık Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tolvett, S., Liu , H., Lents, J., Osses, M., & He, K.** (2007). *A Study of the Emissions from Diesel Vehicles Operating in Beijing, China.* ISSRC.
- Tomaschek, J.** (2013). *Long-term optimization of the transport sector to address greenhouse gas reduction targets under rapid growth –Application of an energy system model for Gauteng province, South Africa.* (Doktora tezi). Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart.
- Topçu, L.** (2008). *Toplu taşımacılık sistemlerinin sera gazı emisyonlarına etkisi.* (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Trofimenko, Y., Komkov, V., & Trofimenko, K.** (2020). Forecast of energy consumption and greenhouse gas emissions by road transport in Russia up to 2050. *Transportation Research Procedia*, 50, 698-707.
- Tuhim.** (2021). *Mevcut Toplu Ulaşım Araç Sayıları. 28 Mayıs 2021 tarihinde İBB Toplu Ulaşım Hizmetleri Müdürlüğü : <https://tuhim.ibb.gov.tr/%C4%B0statistiksel-bilgiler/mevcut-toplu-ula%C5%9F%C4%B1m-ara%C3%A7-say%C4%B1lar%C4%B1/> adresinden alındı*
- Turoń, K.** (2020). Hydrogen-powered vehicles in urban transport systems - current state and development. *Transportation Research Procedia*, 45, 835–841.
- TÜİK.** (2017). *Taşıt-kilometre İstatistikleri, 2017. 10 Ağustos 2020 tarihinde Türkiye İstatistik Kurumu: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tasit-kilometre-Istatistikleri-2017-30885> adresinden alındı*

- TÜİK.** (2021a). *National Inventory Report-Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990-2021*. Ankara: Türkiye İstatistik Kurumu.
- TÜİK.** (2021b). *Nüfus ve Demografi. 7 Mayıs 21, 2021 tarihinde Türkiye İstatistik Kurumu: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=nufus-ve-demografi-109&dil=1> adresinden alındı*
- TÜİK.** (2021c). *Ulaştırma ve Haberleşme İstatistikleri. 7 Mayıs 2021 tarihinde Türkiye İstatistik Kurumu: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=ulastirma-ve-haberlesme-112&dil=1> adresinden alındı*
- TÜİK.** (2021d). *Ulusal Hesaplar. 7 Mayıs 21, 2021 tarihinde Türkiye İstatistik Kurumu: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=ulusal-hesaplar-113&dil=1> adresinden alındı*
- UAB.** (2019). *2019-2023 Stratejik Plan*. Ankara: T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı.
- UAB.** (2020a). *Ulaşan ve Erişen Türkiye 2020*. Ankara: Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı-Strateji Geliştirme Başkanlığı.
- UAB.** (2020b). *Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi ve 2020-2023 Eylem Planı*. Ankara: T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı.
- UAB.** (2020c). *Kanal İstanbul Projesi Çevresel Etki Değerlendirmesi Raporu*. Ankara: T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü.
- Ulaşım da Enerji Verimliliğinin Artırılmasına İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmelik** (2019). *T. C. Resmi Gazete*, 30762, 2 Mayıs 2019.
- UNEP.** (2019). *Emissions Gap Report 2019*. United Nations Environment Programme.
- UNFCCC.** (1992). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Rio de Janeiro.
- UNFCCC.** (2015). *Paris Agreement*. Paris.
- UNFCCC.** (2021). *The Paris Agreement. 3 Nisan 2021 tarihinde United Nations Climate Change: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> adresinden alındı*
- Url-1.** <<http://www.istanbul.gov.tr/>>, erişim tarihi 02.02.2021.
- Url-2.** <<https://istanbul.ktb.gov.tr/>>, erişim tarihi 02.02.2021.
- Url-3.** <https://tr.wikipedia.org/wiki/Atatürk_Havalimanı>, erişim tarihi 03.02.2021.
- Url-4.** <<https://www.sabah.com.tr/ekonomi/2012/01/15/bogazlardan-gecen-gemi-sayisi-azaliyor>>, erişim tarihi 15.07.2021.
- Url-5.** <<http://wowturkey.com/forum/viewtopic.php?t=147875>>, erişim tarihi 24.11.2019.
- Url-6.** <<https://unfccc.int/documents/223579>>, erişim tarihi 23.04.2020.
- Url-7.** <<https://www.airporthaber.com/>>, erişim tarihi 20.06.2019.
- Url-8.** <<https://www.milliyet.com.tr/galeri/otomotiv-devleri-tek-tek-acikladi-dizel-ve-benzinli-arac-uretimini-durduruyorlar-6540544/2>>, erişim tarihi 15.07.2021.

- Vaillancourt, K., Alcocer, Y., Bahn, O., Fertel, C., Frenette, E., Garbouj, H., Kanudia, A., Labriet, M., Loulou, R., Marcy, M., Neji, Y. & Waaub, J. P.** (2014). A Canadian 2050 energy outlook: Analysis with the multi-regional model TIMES-Canada. *Applied Energy*, 132, 56-65.
- WB.** (2018a). *World Development Indicators-Population, total*. 22 Mart 2021 tarihinde The World Bank Data: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?end=2019&start=1960> adresinden alındı
- WB.** (2018b). *State and Trends of Carbon Pricing 2018*. Washington DC: World Bank Group.
- WB.** (2020). *Key Statistics for 2020 on Initiatives Implemented or Scheduled for Implementation*. 9 Mayıs 2021 tarihinde The World Bank-Carbon Pricing Dashboard: https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data adresinden alındı
- WRI.** (2021). *Climate Watch: Nationally Determined Contributions (NDC) Data*. 3 Nisan 2021 tarihinde World Resource Center: <https://www.wri.org/data/climate-watch-nationally-determined-contributions-ndc-data> adresinden alındı
- Xin, G.** (2021). Application of hydrogen energy in low carbon cities . *Earth and Environmental Science*, 766. doi:10.1088/1755-1315/766/1/012053.
- Xiong, S., Wang, Y., Bai, B., & Ma, X.** (2021). A hybrid life cycle assessment of the large-scale application of electric vehicles. *Energy*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119314>.
- Yanarocak, R.** (2007). *Marmaray Projesi'nin kara yolu ulaşımından kaynaklanan sera gazı emisyonlarına etkisi*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- YerelNet.** (2021). *Türkiye'deki iller listeleri – 2021-Yüzölçümü*. 6 Mayıs 2021 tarihinde YerelNet Kültür ve Turizm Derneği: <https://www.yerelnet.org.tr/iller/> adresinden alındı
- Yıldırım, G.** (2010). *Boğaziçi köprüsünün taşıt kaynaklı kirleticilerinin modellenmesi*. (Yüksek Lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yilmazer, K. B.** (2013). *Technological detailed modeling and analysis of electrical energy use and CO2 emissions in turkey within the framework of markal based bottom-up national energy model*. (Yüksek Lisans tezi). Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zeng, D., Dong, Y., Cao, H., Li, Y., Wang, J., Li, Z. & Hauschild, M.Z.** (2021). Are the electric vehicles more sustainable than the conventional ones? Influences of the assumptions and modeling approaches in the case of typical cars in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105210.
- Zhang, H., Chen, W., & Huang, W.** (2016). TIMES modelling of transport sector in China and USA: Comparisons from a decarbonization perspective. *Applied Energy*, 165, 1505-1514.

Zheng, Y., He, X., Wang, H., Wang, M., Zhang, S., Ma, D., Wang, B. & Wu, Y. (2020). Well-to-wheels greenhouse gas and air pollutant emissions from battery electric vehicles in China. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25, 355–370.



EKLER

EK A: Talep Teknolojileri

EK B: Hesaplamalarda Kullanılan Veriler

EK C: Detaylı Sera Gazı Emisyon Sonuçları

EK D: Detaylı Maliyet Sonuç Tabloları



EK A: Talep Teknolojileri**Çizelge A.1 : TIMES-ITSECO modeli talep teknolojileri listesi**

Teknoloji	Teknoloji Tanımı
TADHYDRO	Domestic Airplane, Hydrogen (Ulusal Uçak, Hidrojen)
TADJTF	Domestic Airplane, Jet Fuel (Ulusal Uçak, Jet Yakıtı)
TAIHYDRO	International Airplane, Hydrogen (Uluslararası Uçak, Hidrojen)
TAIJTF	International Airplane, Jet Fuel (Uluslararası Uçak, Jet Yakıtı)
TBUSCNG	Bus-Compressed Natural Gas (Otobüs-Sıkıştırılmış Doğalgaz)
TBUSCNGPT	Bus-Compressed Natural Gas, Public Transportation (Otobüs-Sıkıştırılmış Doğalgaz, Toplu Ulaşım)
TBUSDSL	Bus-Diesel (Otobüs-Dizel)
TBUSDSLPT	Bus-Diesel, Public Transportation (Otobüs-Dizel, Toplu Ulaşım)
TBUSGSL	Bus-Gasoline (Otobüs-Benzin)
TBUSHYDRO	Bus-Hydrogen (Otobüs-Hidrojen)
TBUSLPG	Bus-LPG (Otobüs, Sıvılaştırılmış petrol gazı)
TCARCNG	Car-Compressed Natural Gas (Otomobil-Sıkıştırılmış Doğalgaz)
TCARDSL-EURO1	Car-Diesel-Euro1 (Otomobil-Dizel-Euro 1)
TCARDSL-EURO4	Car-Diesel-Euro4 (Otomobil-Dizel-Euro 4)
TCARDSL-EURO5	Car-Diesel-Euro5 (Otomobil-Dizel-Euro 5)
TCARDSL-EURO6	Car-Diesel-Euro6 (Otomobil-Dizel-Euro 6)
TCARDSL-NECS	Car-Diesel-No Emission Control Standard (Otomobil-Dizel-Emisyon Kontrol Teknolojisi Bulunmayan)

Çizelge A.1 (devam): TIMES-ITSECO modeli talep teknolojileri listesi.

Teknoloji	Teknoloji Tanımı
TCARDSLPT-EUR4	Car-Diesel, Public Transportation-Euro4 (Otomobil-Dizel,Toplu Ulaşım-Euro 4)
TCARDSLPT-EUR5	Car-Diesel, Public Transportation-Euro5 (Otomobil-Dizel,Toplu Ulaşım-Euro 5)
TCARDSLPT-EUR6	Car-Diesel, Public Transportation-Euro6 (Otomobil-Dizel,Toplu Ulaşım-Euro 6)
TCARELC-BEV	Car-Electric-BEV (Otomobil-Elektrik-Pilli Elektrikli Araç)
TCARGSL-EURO1	Car-Gasoline-Euro1 (Otomobil-Benzin-Euro 1)
TCARGSL-EURO4	Car-Gasoline-Euro4 (Otomobil-Benzin-Euro 4)
TCARGSL-EURO5	Car-Gasoline-Euro5 (Otomobil-Benzin-Euro 5)
TCARGSL-EURO6	Car-Gasoline-Euro6 (Otomobil-Benzin-Euro 6)
TCARGSL-NECS	Car-Gasoline-No Emission Control Standard (Otomobil-Benzin-Emisyon Kontrol Teknolojisi Bulunmayan)
TCARHYB	Car-Hybrid (Otomobil-Hibrit)
TCARHYDRO	Car-Hydrogen (Otomobil-Hidrojen)
TCARLPG	Car-LPG (Otomobil-Sıvılaştırılmış petrol gazı)
TCARLPGPT	Car-LPG, Public Transportation (Otomobil-Sıvılaştırılmış petrol gazı, Toplu Ulaşım)
TLDTDSL	Light Duty Truck, Diesel (Kamyonet, Dizel)
TLDTGSL	Light Duty Truck, Gasoline (Kamyonet, Benzin)
TLDTLPG	Light Duty Truck, LPG (Kamyonet,Sıvılaştırılmış petrol gazı)
TMBUSDSL	Minibus-Diesel (Minibüs-Dizel)

Çizelge A.1 (devam): TIMES-ITSECO modeli talep teknolojileri listesi.

Teknoloji	Teknoloji Tanımı
TMBUSDSLPT	Minibus-Diesel, Public Transportation (Minibüs-Dizel, Toplu Ulaşım)
TMBUSGSL	Minibus-Gasoline (Minibüs-Benzin)
TMBUSGSLPT	Minibus-Gasoline, Public Transportation (Minibüs-Benzin, Toplu Ulaşım)
TMBUSLPG	Minibus-LPG (Minibüs- Sıvılaştırılmış petrol gazı)
TMBUSLPGPT	Minibus-LPG, Public Transportation (Minibüs- Sıvılaştırılmış petrol gazı, Toplu Ulaşım)
TMCYCLEGSL	Motorcycle, Gasoline (Motosiklet, Benzin)
TMDDSL	Domestic Ship - Maritime Diesel (Ulusal Gemi-Dizel)
TMDFOIL	Domestic Ship-Maritime Fuel Oil (Ulusal Gemi-Fuel Oil)
TMETBUSDSLPT	Metrobus-Diesel, Public Transportation (Metrobüs-Dizel,Toplu Ulaşım)
TMIDSL	International Ship- Maritime Diesel (Uluslararası Gemi-Dizel)
TMIFOIL	International Ship-Maritime Fuel Oil (Uluslararası Gemi-Fuel Oil)
TOTHCNG	Other Vehicle-Compressed Natural Gas (Diğer-Sıkıştırılmış Doğalgaz)
TOTHDSL	Other Vehicle-Diesel (Diğer-Dizel)
TOTHGSL	Other Vehicle-Gasoline (Diğer-Benzin)
TOTHLPG	Other Vehicle-LPG (Diğer-Sıvılaştırılmış petrol gazı)
TRELCFT	Rail Electric Funicular Teleferic Tech (Füniküler Teleferik-Elektrik)
TRELCM	Rail Electric Metro Tech (Metro-Elektrik)

Çizelge A.1 (devam): TIMES-ITSECO modeli talep teknolojileri listesi.

Teknoloji	Teknoloji Tanımı
TRELCMAR	Rail Electric -Marmaray (Marmaray-Elektrik)
TRELCT	Rail Electric Tramway Tech (Tramvay-Elektrik)
TTRACDSL	Tractor, Diesel (Traktör-Dizel)
TTRACGSL	Tractor, Gasoline (Traktör-Benzin)
TTRUCKCNG	Truck, Compressed Natural Gas (Kamyon, Sıkıştırılmış Doğalgaz)
TTRUCKDSL	Truck, Diesel (Kamyon, Dizel)
TTRUCKGSL	Truck, Gasoline (Kamyon, Benzin)
TTRUCKHYDRO	Truck, Hydrogen (Kamyon, Hidrojen)
TTRUCKLPG	Truck, LPG (Kamyon, Sıvılaştırılmış petrol gazı)

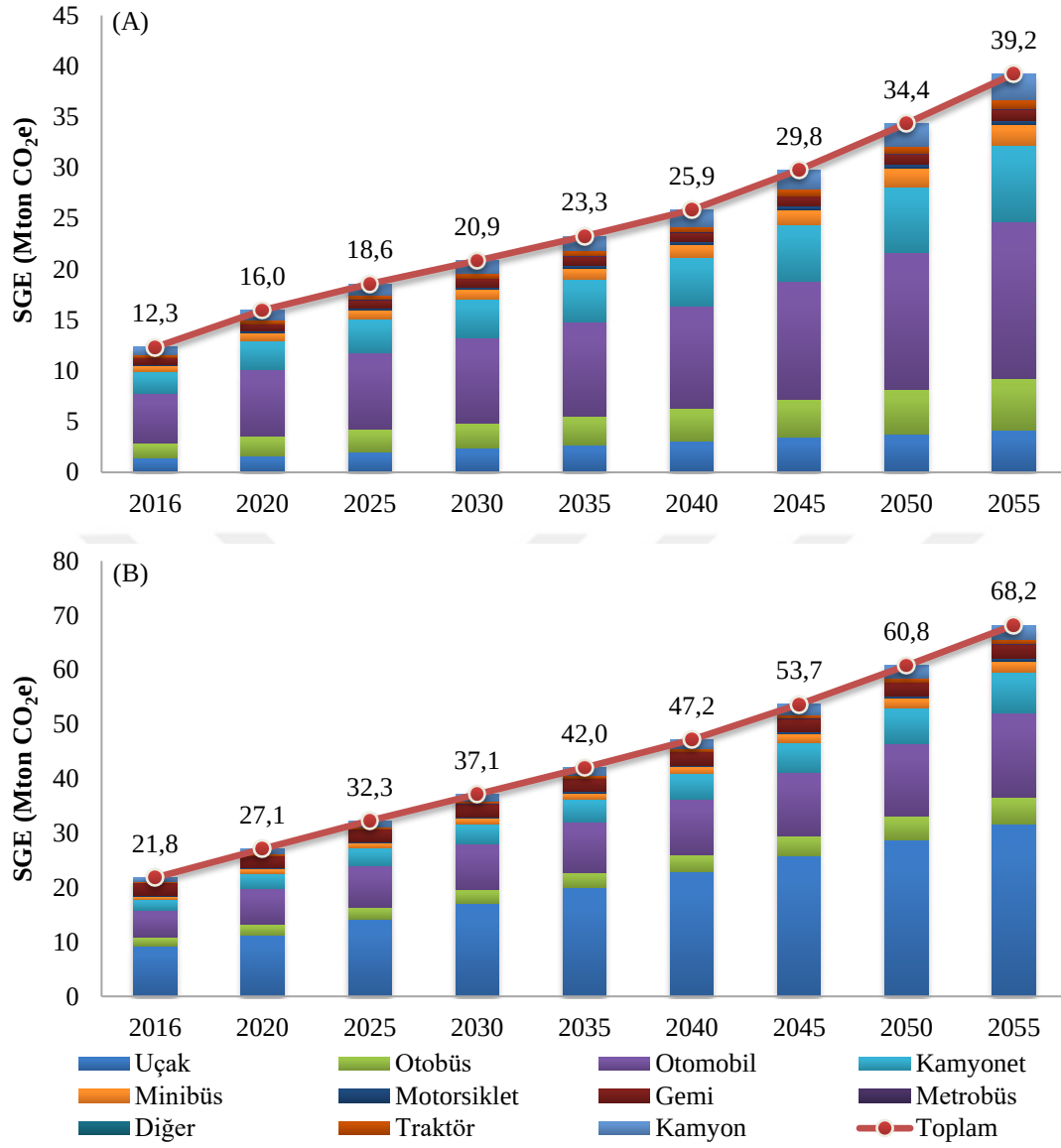
EK B: Hesaplamalarda Kullanılan Veriler**Çizelge B.1 : Detaylı nüfus verileri.**

Yıl	İstanbul Nüfus	İstanbul 15-64 Yaş Nufusu	Türkiye Nüfus	Türkiye 15-64 Yaş Nufusu
2007	12.573.836	8.788.074	70.586.256	46.943.690
2008	12.697.164	8.935.641	71.517.100	47.835.090
2009	12.915.158	9.097.979	72.561.312	48.618.564
2010	13.255.685	9.355.141	73.722.988	49.516.670
2011	13.624.240	9.654.326	74.724.269	50.346.979
2012	13.854.740	9.837.334	75.627.384	51.088.202
2013	14.160.467	10.076.632	76.667.864	51.926.356
2014	14.377.018	10.243.634	77.695.904	52.640.512
2015	14.657.434	10.442.810	78.741.053	53.359.594
2016	14.804.116	10.562.075	79.814.871	54.237.586
2017	15.029.231	10.714.927	80.810.525	54.881.652
2018	15.067.724	10.729.219	82.003.882	55.633.349
2019	15.519.267	11.077.045	83.154.997	56.194.286
2020	15.984.342	11.419.900	83.900.373	56.755.223
2021	16.463.353	11.738.641	84.908.658	57.316.159
2022	16.956.720	12.067.583	85.911.035	57.877.096
2023	17.464.872	12.407.057	86.907.367	58.438.033
2024	17.951.709	12.692.870	87.885.571	58.801.876
2025	18.414.557	12.962.501	88.844.934	59.165.720
2026	18.850.808	13.214.601	89.784.584	59.529.563
2027	19.257.953	13.447.892	90.703.600	59.893.406
2028	19.671.108	13.687.264	91.601.117	60.257.250
2029	20.090.283	13.932.896	92.476.323	60.621.093
2030	20.298.663	14.035.035	93.328.574	60.984.936
2031	20.506.002	14.140.198	94.153.776	61.348.780
2032	20.712.272	14.248.418	94.951.512	61.712.623
2033	20.917.332	14.359.654	95.721.347	62.076.467
2034	21.121.156	14.473.920	96.463.090	62.440.310
2035	21.323.621	14.591.135	97.176.768	62.804.153
2036	21.524.565	14.711.178	97.862.549	63.167.997
2037	21.723.975	14.834.018	98.520.720	63.531.840
2038	21.921.914	14.959.694	99.151.467	63.895.683
2039	22.118.315	15.088.168	99.754.923	64.259.527
2040	22.313.126	15.219.414	100.331.233	64.623.370
2041	22.506.312	15.273.104	100.882.655	64.628.558
2042	22.697.951	15.328.769	101.409.507	64.633.746
2043	22.888.101	15.386.425	101.911.980	64.638.933
2044	23.076.809	15.446.096	102.390.159	64.644.121
2045	23.263.855	15.507.652	102.843.989	64.649.309
2046	23.449.250	15.571.098	103.273.571	64.654.497
2047	23.633.110	15.636.508	103.679.038	64.659.685
2048	23.815.360	15.703.867	104.060.257	64.664.872
2049	23.996.052	15.773.249	104.417.089	64.670.060
2050	24.174.995	15.844.568	104.749.423	64.675.248
2051	24.352.100	15.916.737	105.064.635	64.680.436
2052	24.527.305	15.989.763	105.362.568	64.685.624
2053	24.700.551	16.063.676	105.642.913	64.690.811
2054	24.871.779	16.138.499	105.905.418	64.695.999
2055	25.040.929	16.214.263	106.149.786	64.701.187

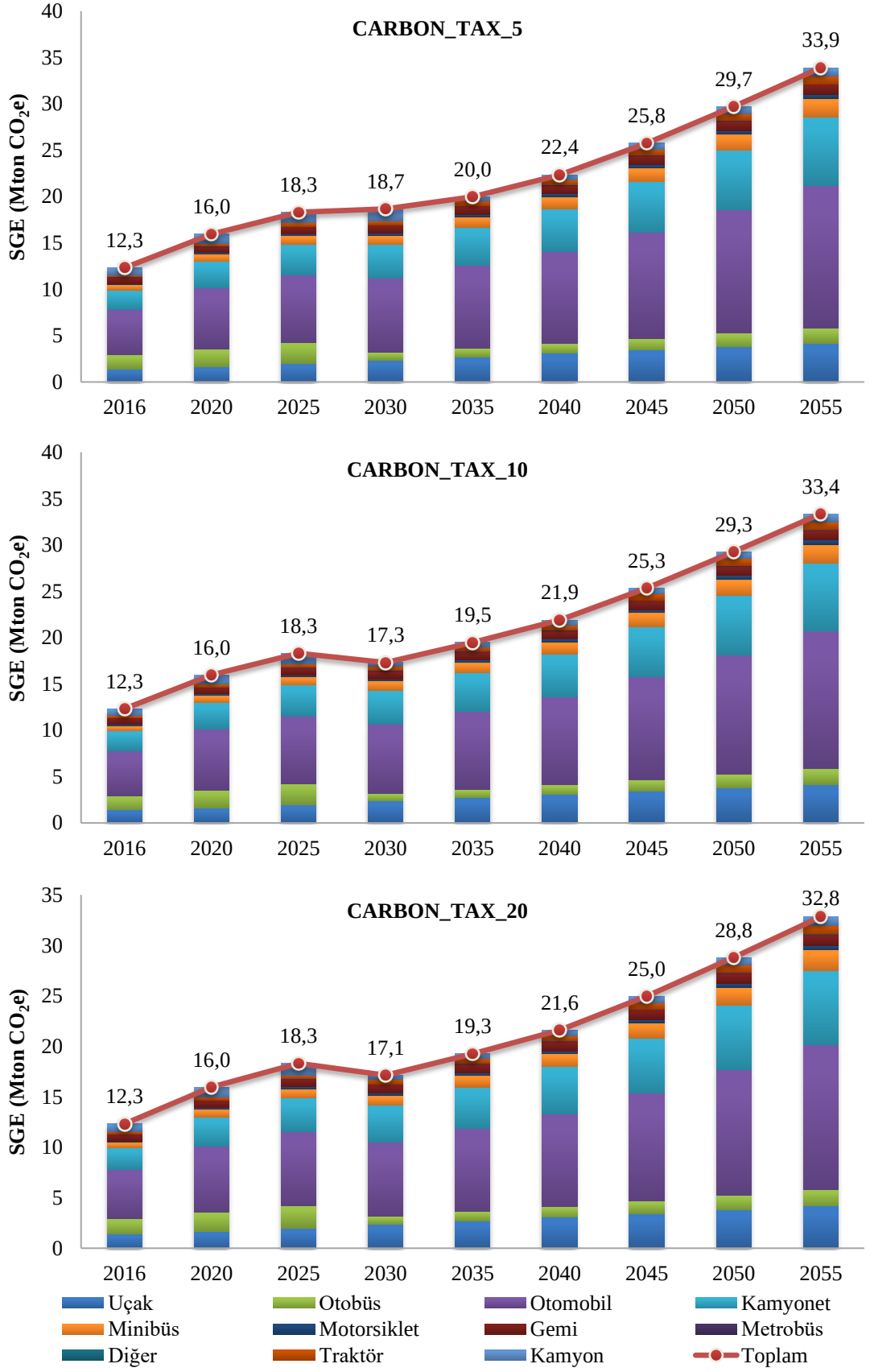
Çizelge B.2 : OECD'nin Türkiye GSYİH projeksiyonu.

Yıl	GSYİH (Milyon\$)
2020	2.308.404
2021	2.453.322
2022	2.587.412
2023	2.710.000
2024	2.824.908
2025	2.936.290
2026	3.045.759
2027	3.154.511
2028	3.263.320
2029	3.372.632
2030	3.482.651
2031	3.593.485
2032	3.705.207
2033	3.817.957
2034	3.932.029
2035	4.047.934
2036	4.166.401
2037	4.288.016
2038	4.413.314
2039	4.542.750
2040	4.676.503
2041	4.814.724
2042	4.957.533
2043	5.104.826
2044	5.256.251
2045	5.411.470
2046	5.569.864
2047	5.730.548
2048	5.892.868
2049	6.056.272
2050	6.220.140
2051	6.384.002
2052	6.547.556
2053	6.710.670
2054	6.873.379
2055	7.035.890

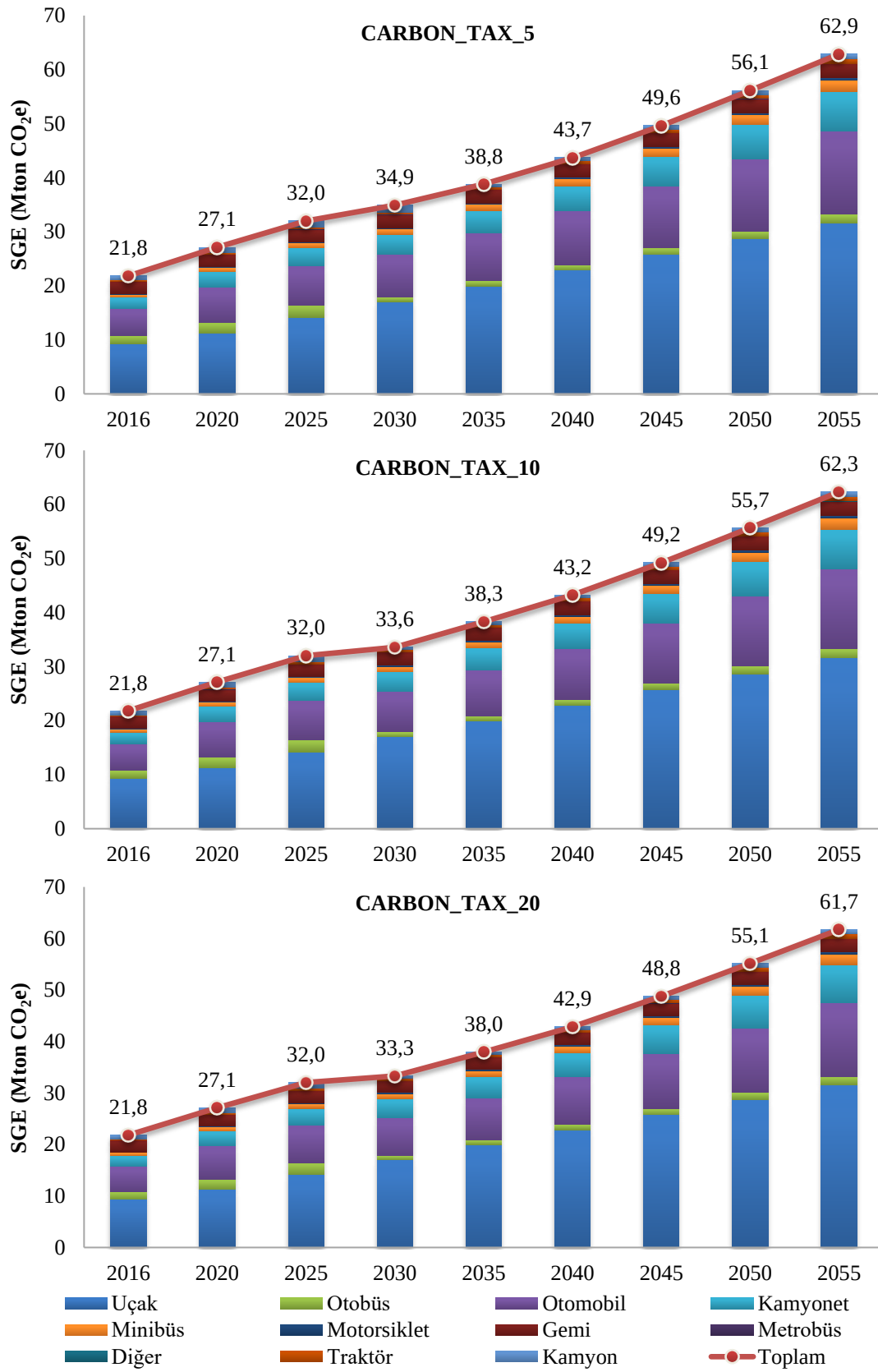
EK C: Detaylı Sera Gazı Emisyon Sonuçları



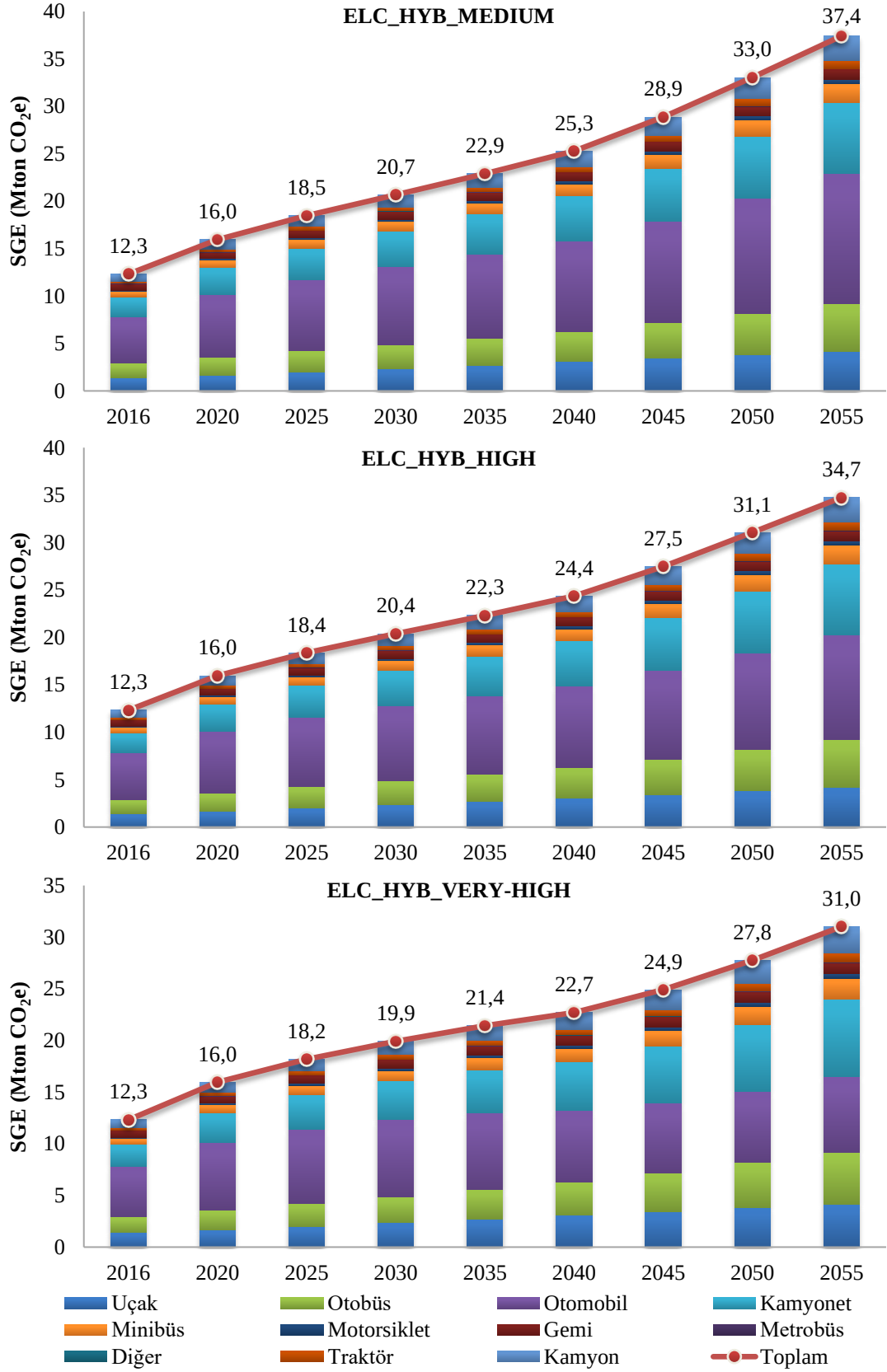
Şekil C.1 : Baz senaryo araç türüne göre sera gazı emisyonları (A):UA dahil değil, (B):UA dahil.



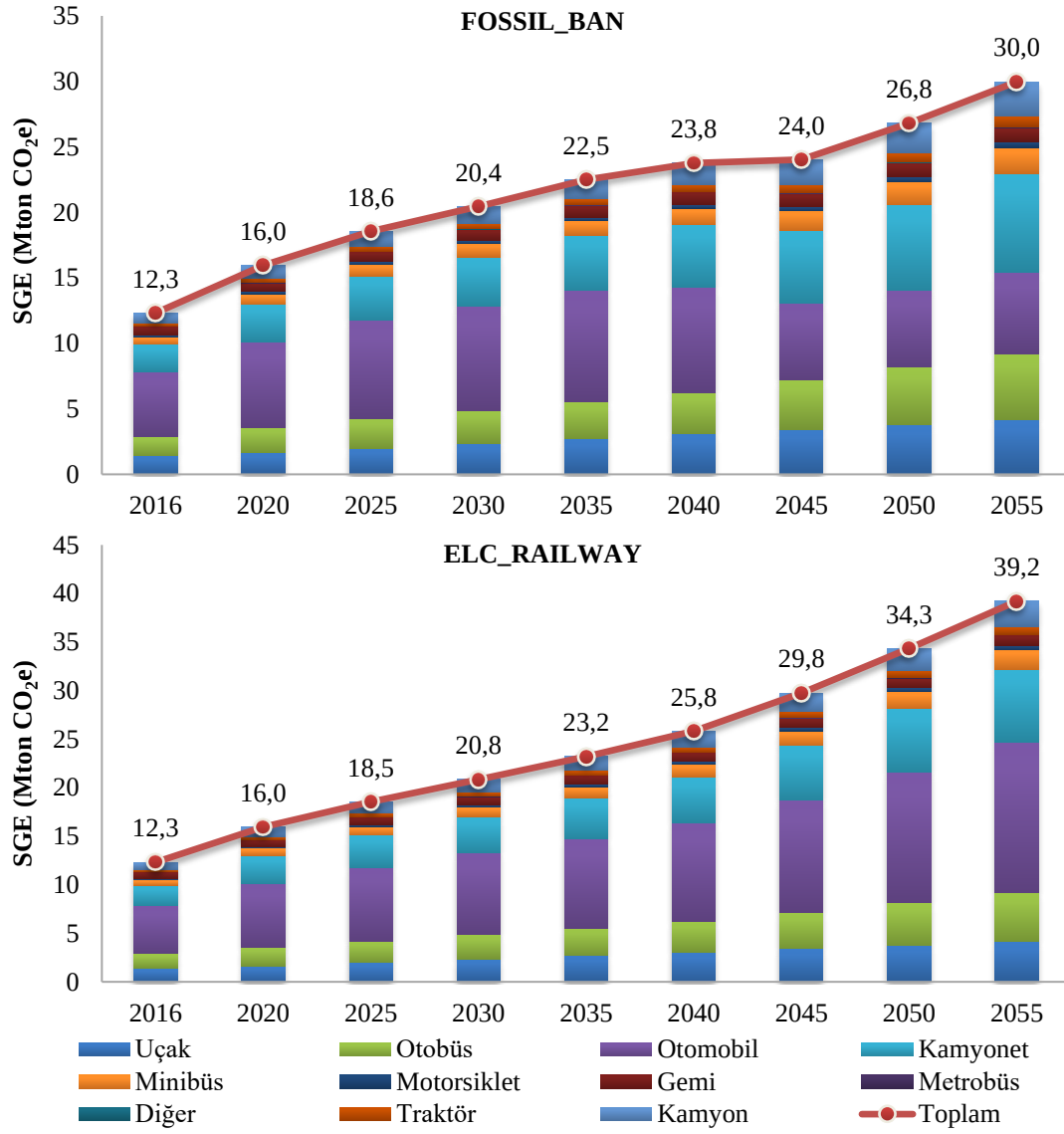
Şekil C.2 : Karbon vergisi senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları.



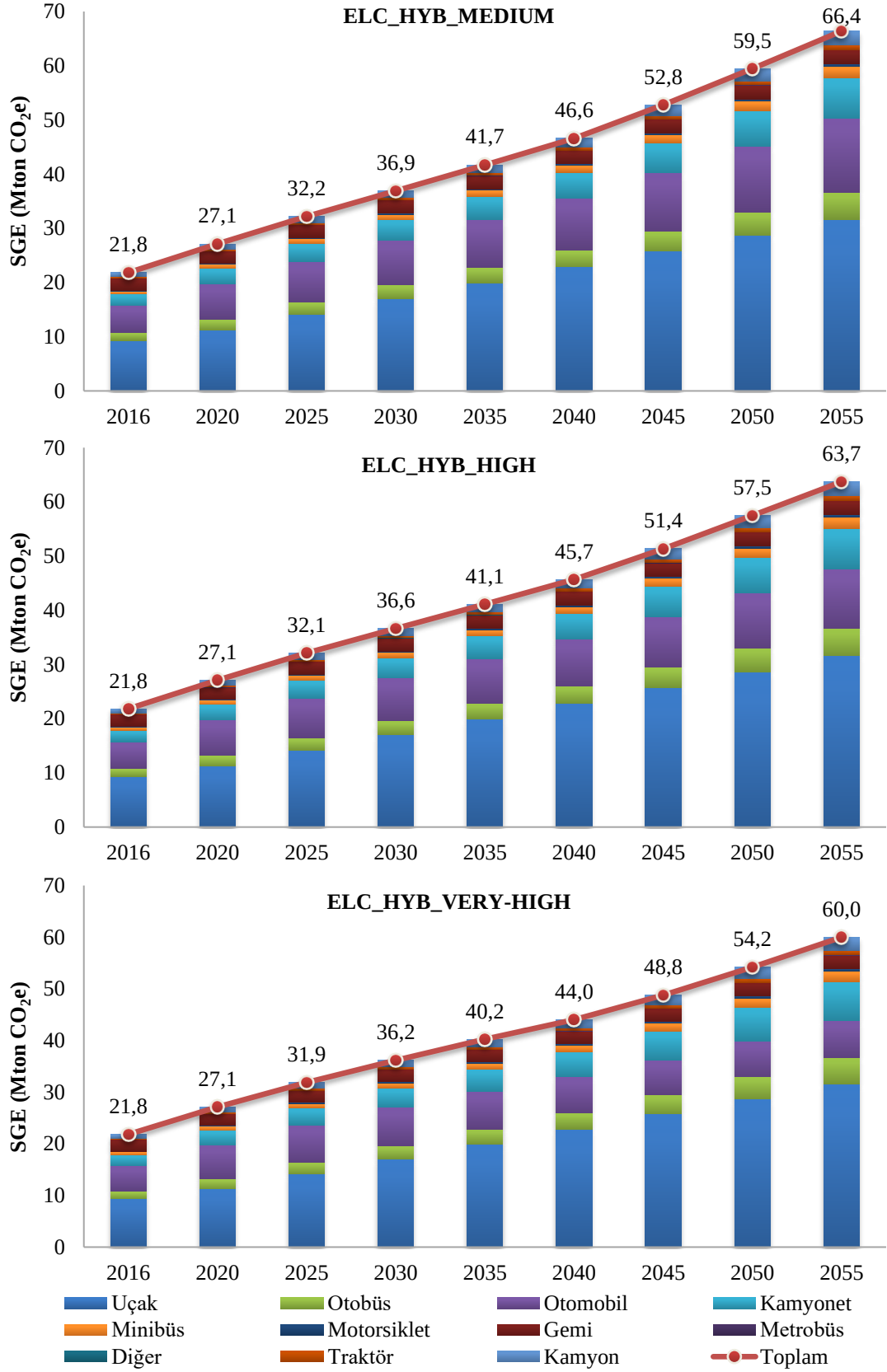
Şekil C.3 : Karbon vergisi senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.



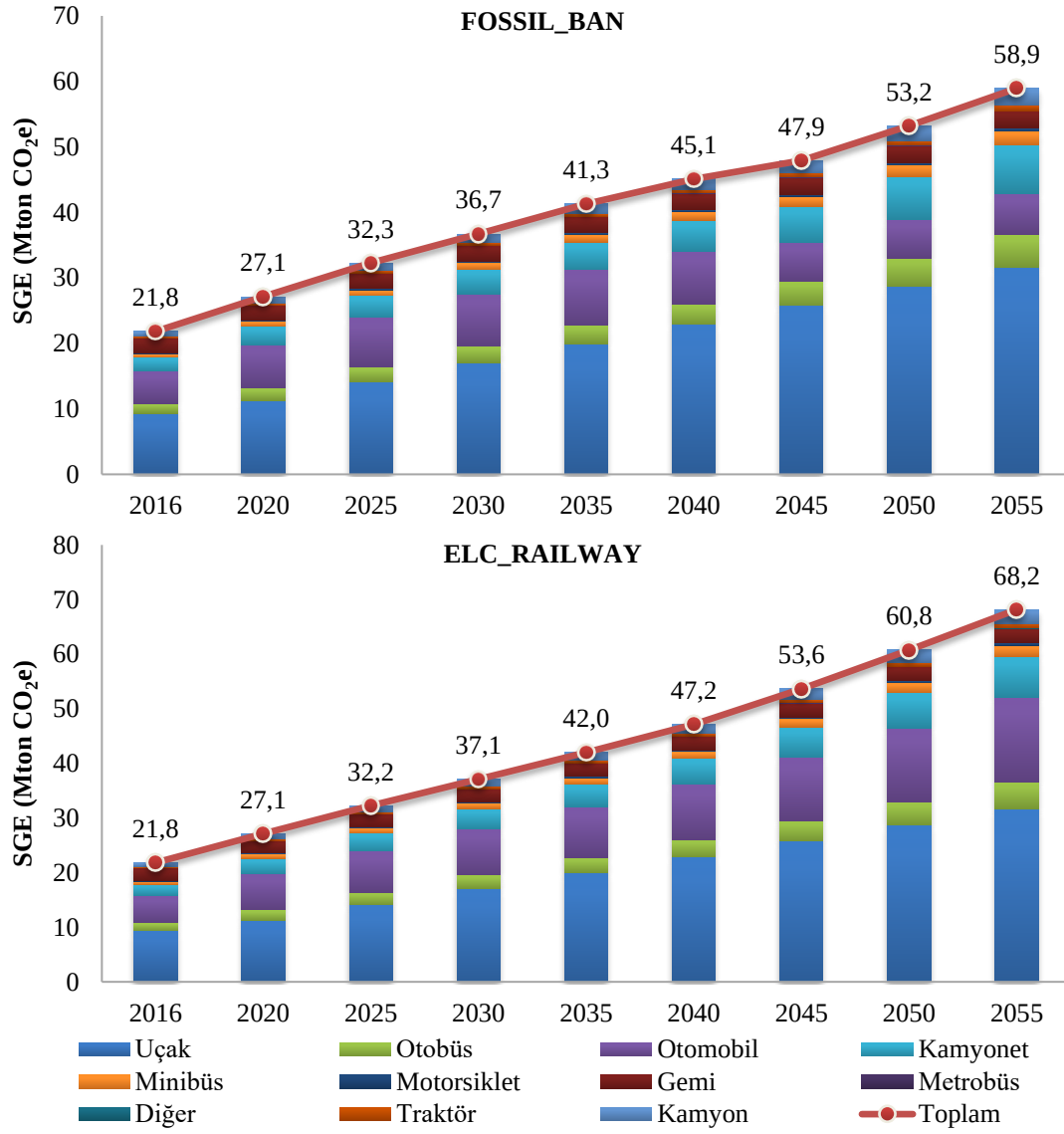
Şekil C.4 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları.



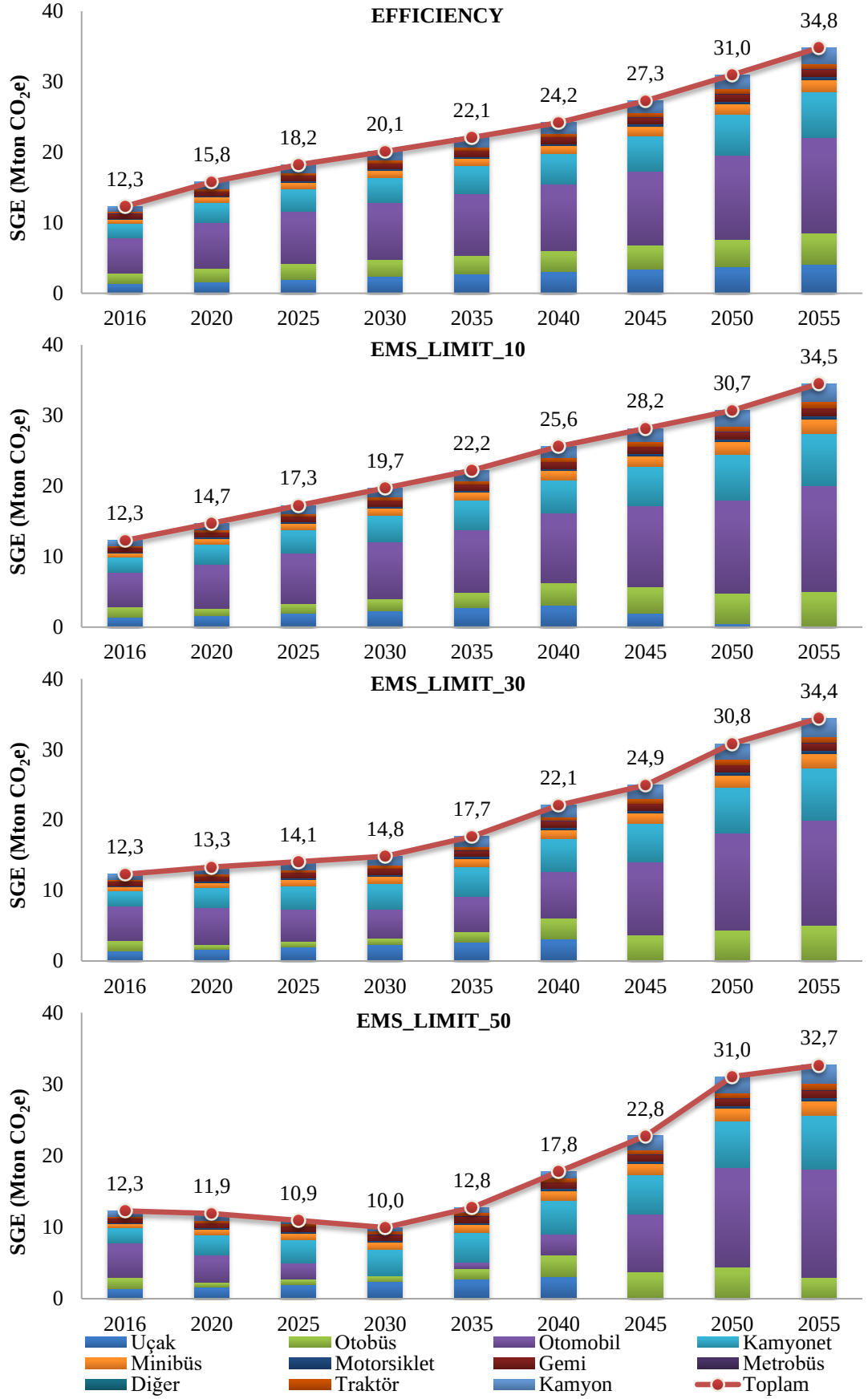
Şekil C.4 (devam) : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları.



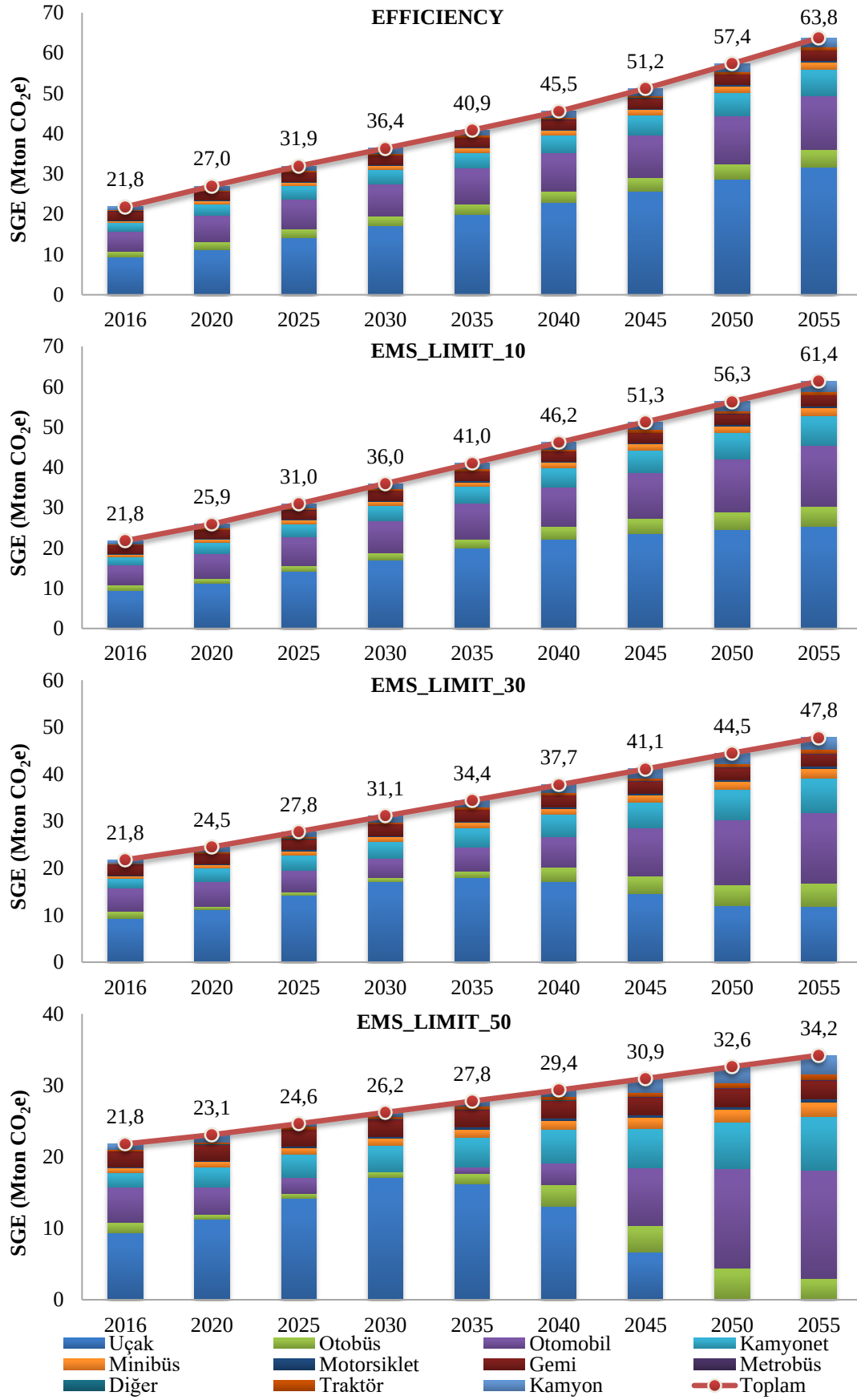
Şekil C.5 : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.



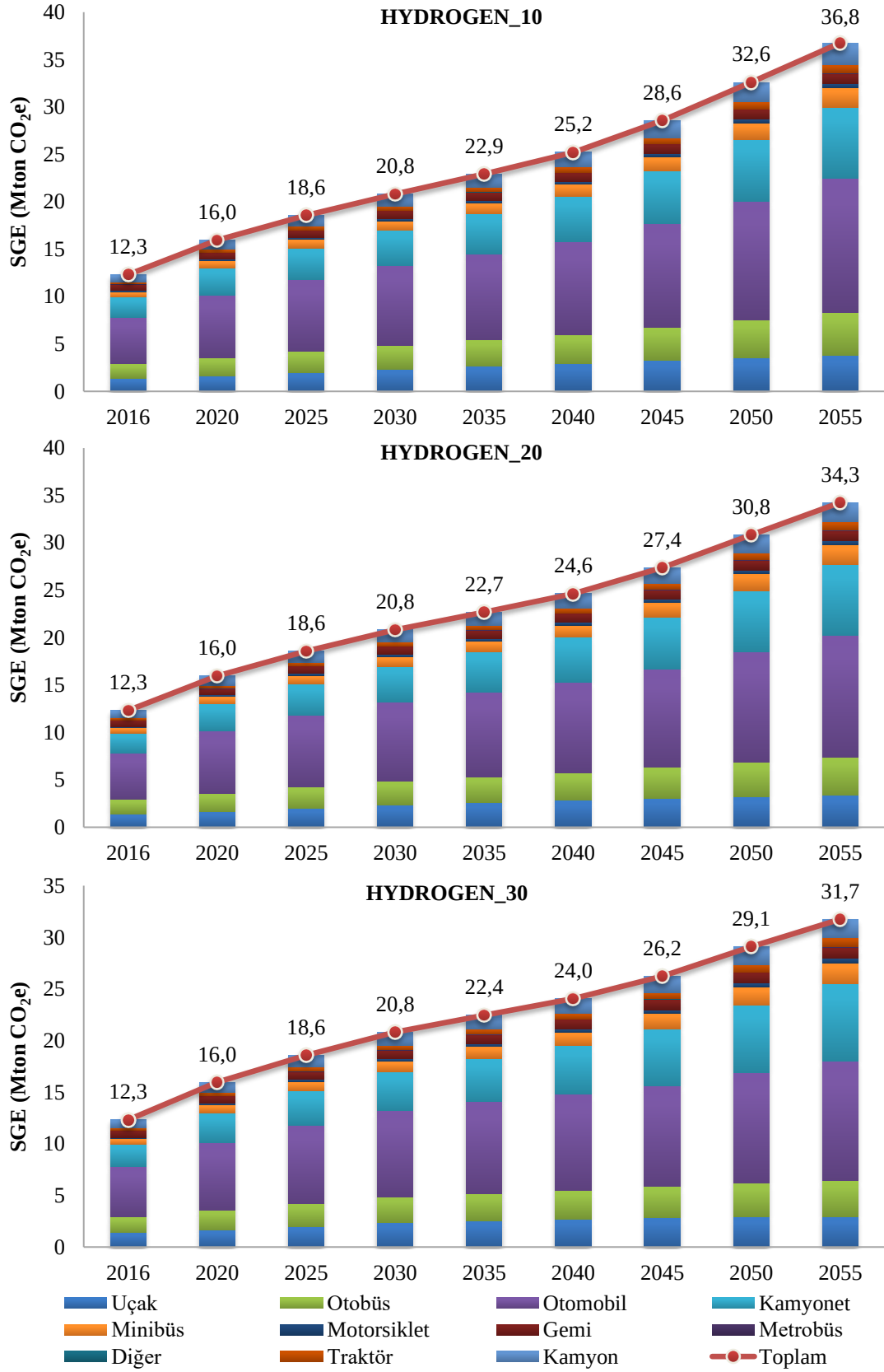
Şekil C.5 (devam) : Elektrikli ve hibrit araç senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.



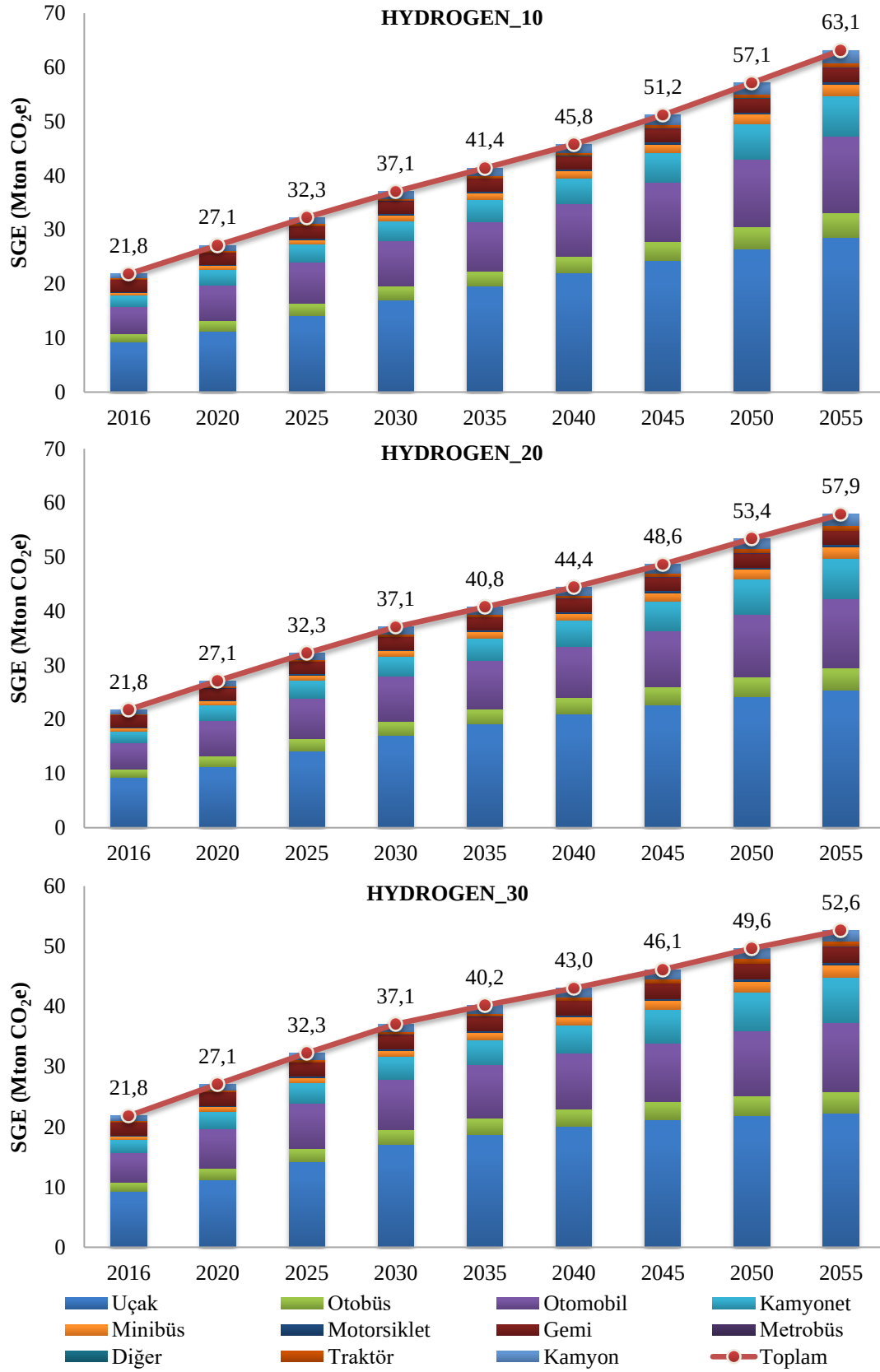
Şekil C.6 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları.



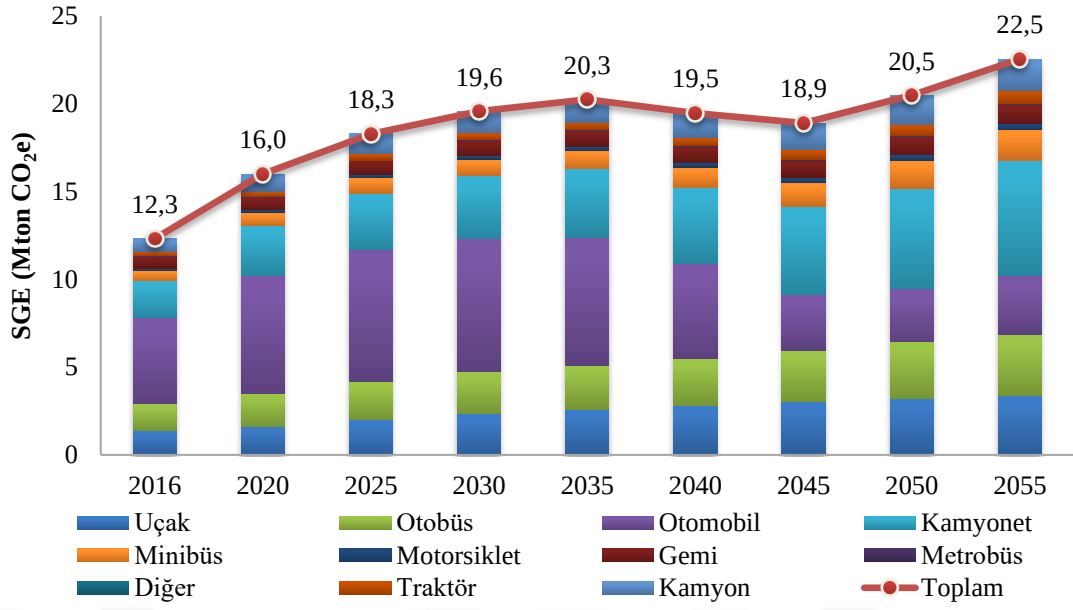
Şekil C.7 : Verimlilik ve emisyon limit senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.



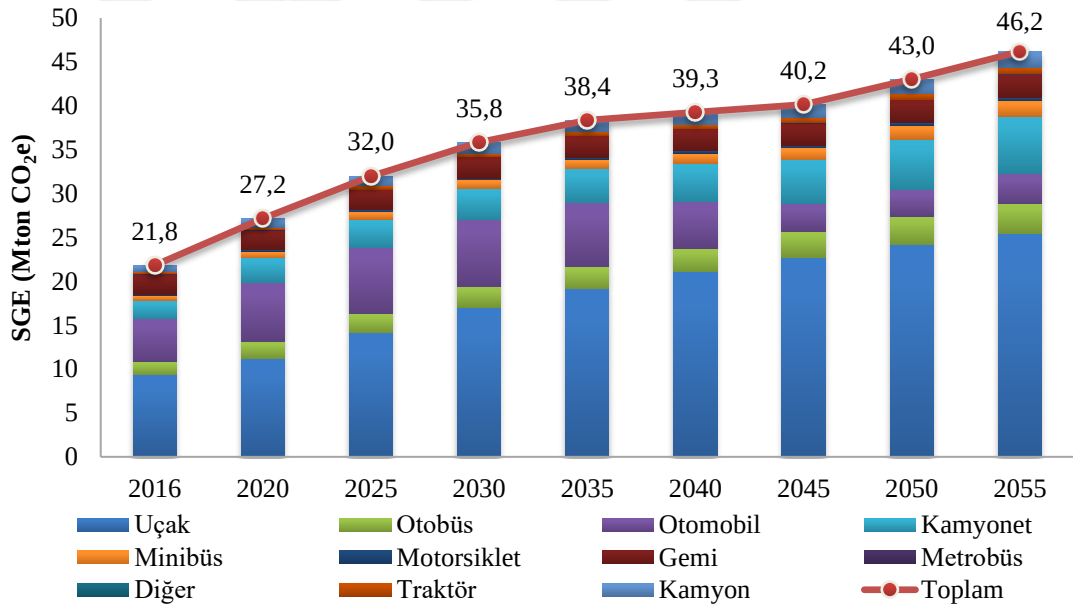
Şekil C.8 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları.



Şekil C.9 : Hidrojen yakıtlı araç senaryoları araç türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.



Şekil C.10 : Toplu önlem senaryosu araç türüne göre sera gazı emisyonları.



Şekil C.11 : Toplu önlem senaryosu araç türüne göre sera gazı emisyonları, UA dahil.

EK D: Detaylı Maliyet Sonuç Tabloları**Çizelge D.1 : İlk yatırım maliyetleri, Milyon \$ (UA Dahil değil).**

Yıl	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
BASE	12.202	16.324	19.178	21.752	24.754	24.027	32.347	37.702	43.322
CARBON_TAX_10	12.202	16.324	19.178	28.799	32.336	31.898	41.277	48.125	55.350
CARBON_TAX_20	12.202	16.324	19.178	30.354	34.331	34.449	44.615	52.282	60.106
CARBON_TAX_5	12.202	16.324	19.178	24.469	30.295	30.131	39.722	46.312	53.279
EFFICIENCY	12.202	16.324	19.178	21.752	24.754	24.027	32.347	37.702	43.322
ELC-HYB-HGH	12.202	16.330	19.390	22.419	26.156	26.276	35.646	42.181	49.082
ELC-HYB-MEDIUM	12.202	16.330	19.253	21.983	25.232	24.865	33.636	39.509	45.693
ELC-HYB-VERY-HGH	12.202	16.330	19.626	23.241	27.939	28.877	39.509	47.799	57.367
EMSLIMIT_10	12.202	17.790	20.649	23.187	26.169	24.017	33.954	41.843	49.274
EMSLIMIT_30	12.202	20.710	27.983	34.656	37.519	32.229	39.715	44.276	52.533
EMSLIMIT_50	12.202	24.446	37.430	50.177	53.030	43.956	45.702	46.805	57.489
FOSSIL-BAN	12.202	16.324	19.178	22.153	26.663	29.777	38.378	45.918	53.416
HYDROGEN-10	12.202	16.324	19.178	21.693	25.498	25.401	34.505	40.930	47.286
HYDROGEN-20	12.202	16.324	19.178	21.693	26.014	26.567	36.484	44.030	51.239
HYDROGEN-30	12.202	16.324	19.178	21.693	26.530	27.732	38.462	47.131	55.192
RAILWAY	12.202	16.715	22.209	25.604	29.198	28.520	37.195	42.739	48.538
SUPER-SCENARIO	12.202	16.478	22.126	26.447	34.097	40.745	50.772	59.796	67.533

Çizelge D.2 : İşletme ve bakım maliyetleri, Milyon \$ (UA Dahil değil).

Yıl	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
BASE	2.987	3.902	4.551	5.126	5.841	5.576	7.403	8.533	9.821
CARBON_TAX_10	2.987	3.902	4.551	7.552	8.499	8.433	10.689	12.405	14.290
CARBON_TAX_20	2.987	3.902	4.551	7.888	8.926	8.976	11.395	13.281	15.292
CARBON_TAX_5	2.987	3.902	4.551	6.289	8.080	8.071	10.370	12.020	13.853
EFFICIENCY	2.987	3.902	4.551	5.126	5.841	5.576	7.403	8.533	9.821
ELC-HYB-HGH	2.987	3.902	4.552	5.114	5.799	5.493	7.242	8.266	9.416
ELC-HYB-MEDIUM	2.987	3.902	4.552	5.123	5.828	5.546	7.340	8.426	9.656
ELC-HYB-VERY-HGH	2.987	3.902	4.552	5.114	5.789	5.394	7.055	8.051	9.305
EMSLIMIT_10	2.987	4.511	5.161	5.728	6.433	5.575	7.544	8.979	10.430
EMSLIMIT_30	2.987	4.922	6.000	6.968	7.652	6.268	7.975	9.348	10.835
EMSLIMIT_50	2.987	5.187	7.250	8.656	9.337	7.671	8.392	9.758	12.586
FOSSIL-BAN	2.987	3.902	4.551	5.124	5.951	5.852	7.076	8.003	9.067
HYDROGEN-10	2.987	3.902	4.551	5.114	5.869	5.619	7.427	8.558	9.787
HYDROGEN-20	2.987	3.902	4.551	5.114	5.888	5.653	7.445	8.578	9.751
HYDROGEN-30	2.987	3.902	4.551	5.114	5.907	5.686	7.463	8.598	9.715
RAILWAY	2.987	4.097	6.218	7.248	8.271	8.041	10.055	11.289	12.675
SUPER-SCENARIO	2.987	4.098	6.220	7.223	8.381	8.214	9.558	10.621	11.769

Çizelge D.3 : İlk yatırım maliyetleri, Milyon \$ (UA Dahil).

Yıl	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
BASE	20.208	25.896	31.116	36.056	41.425	43.063	53.751	61.234	69.474
CARBON_TAX_10	20.208	25.896	31.116	43.103	49.007	50.935	62.681	71.657	81.502
CARBON_TAX_20	20.208	25.896	31.116	45.228	51.573	54.057	66.591	76.387	86.832
CARBON_TAX_5	20.208	25.896	31.116	38.773	46.966	49.168	61.126	69.844	79.431
EFFICIENCY	20.208	25.896	31.116	36.056	41.425	43.063	53.751	61.234	69.474
ELC-HYB-HGH	20.208	25.901	31.328	36.723	42.827	45.313	57.050	65.713	75.235
ELC-HYB-MEDIUM	20.208	25.901	31.191	36.287	41.902	43.902	55.039	63.042	71.845
ELC-HYB-VERY-HGH	20.208	25.901	31.564	37.545	44.610	47.914	60.912	71.331	83.519
EMSLIMIT_10	20.208	27.362	32.586	37.491	42.840	43.921	56.223	66.241	77.662
EMSLIMIT_30	20.208	30.282	39.920	48.960	56.376	57.363	69.369	81.477	95.371
EMSLIMIT_50	20.208	34.017	49.367	64.481	73.730	73.451	83.913	96.959	112.984
FOSSIL-BAN	20.208	25.896	31.116	36.457	43.334	48.814	59.781	69.450	79.569
HYDROGEN-10	20.208	25.896	31.116	35.997	42.373	44.702	56.245	64.884	73.958
HYDROGEN-20	20.208	25.896	31.116	35.997	42.937	45.978	58.411	68.262	78.294
HYDROGEN-30	20.208	25.896	31.116	35.997	43.501	47.254	60.576	71.640	82.630
RAILWAY	20.208	26.286	34.146	39.908	45.868	47.557	58.598	66.271	74.690
SUPER-SCENARIO	20.208	26.049	34.064	40.751	51.020	60.156	72.699	84.027	94.587

Çizelge D.4 : İşletme ve bakım maliyetleri, Milyon \$ (UA Dahil değil).

Yıl	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
BASE	4.030	5.088	5.964	6.765	7.706	7.667	9.720	10.949	12.600
CARBON_TAX_10	4.030	5.088	5.964	9.191	10.364	10.524	13.006	14.821	17.069
CARBON_TAX_20	4.030	5.088	5.964	9.833	11.098	11.374	14.020	16.005	18.379
CARBON_TAX_5	4.030	5.088	5.964	7.928	9.945	10.162	12.687	14.437	16.632
EFFICIENCY	4.030	5.088	5.964	6.765	7.706	7.667	9.720	10.949	12.600
ELC-HYB-HGH	4.030	5.088	5.965	6.753	7.664	7.584	9.559	10.682	12.195
ELC-HYB-MEDIUM	4.030	5.088	5.965	6.762	7.693	7.637	9.657	10.842	12.435
ELC-HYB-VERY-HGH	4.030	5.088	5.964	6.753	7.654	7.485	9.372	10.467	12.083
EMSLIMIT_10	4.030	5.697	6.574	7.366	8.298	7.749	9.944	11.478	13.422
EMSLIMIT_30	4.030	6.108	7.413	8.606	9.726	8.942	11.080	13.069	15.207
EMSLIMIT_50	4.030	6.373	8.663	10.295	11.587	10.760	12.314	14.716	18.166
FOSSIL-BAN	4.030	5.088	5.964	6.763	7.816	7.944	9.394	10.419	11.845
HYDROGEN-10	4.030	5.088	5.964	6.753	7.754	7.735	9.777	11.014	12.615
HYDROGEN-20	4.030	5.088	5.964	6.752	7.778	7.780	9.813	11.061	12.616
HYDROGEN-30	4.030	5.088	5.964	6.752	7.801	7.824	9.848	11.107	12.617
RAILWAY	4.030	5.284	7.631	8.887	10.136	10.132	12.372	13.705	15.453
SUPER-SCENARIO	4.030	5.284	7.632	8.862	10.270	10.341	11.925	13.103	14.634



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Tuğba DOĞAN GÜZEL

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
- **Lisans** : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Doğan Güzel, T., Alp, K.** 2019. Modeling of Greenhouse Gas Emissions from Transportation Sector in Istanbul. *18th World Clean Air Congress*, September 23-27, 2019 Istanbul, Turkey.
- **Doğan Güzel, T., Alp, K.** 2020. Modeling of Greenhouse Gas Emissions from the Transportation Sector in Istanbul by 2050, *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2190-2201.