

**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI**

**AVRUPA BİRLİĞİ ÜLKELERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN
KARAYOLU ULAŞTIRMASI PERSPEKTİFİNDEN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Doktora Tezi

Gökhan MACİT

Ankara, 2024

**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI**

**AVRUPA BİRLİĞİ ÜLKELERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN
KARAYOLU ULAŞTIRMASI PERSPEKTİFİNDEN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Doktora Tezi

Gökhan MACİT

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ**

Ankara, 2024

**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI**

**AVRUPA BİRLİĞİ ÜLKELERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN
KARAYOLU ULAŞTIRMASI PERSPEKTİFİNDEN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Doktora Tezi

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ**

TEZ JÜRİSİ ÜYELERİ

Adı ve Soyadı

- 1- Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ
- 2- Prof. Dr. Güven SAYILGAN
- 3- Prof. Dr. Kadir GÜRDAL
- 4- Prof. Dr. Güray KÜÇÜKKOCAOĞLU
- 5- Doç. Dr. Ayşe YILDIZ

**Tez Savunması Tarihi:
03.12.2024**

TÜRKİYE CUMHURİYETİ

ANKARA ÜNİVERSİTESİ

Sosyal Bilimler Enstitüsü Müdürlüğü'ne

Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ danışmanlığında hazırladığım **“Avrupa Birliği Ülkelerinin Enerji Verimliliğinin Karayolu Ulaştırması Perspektifinden Değerlendirilmesi” (Ankara.2024)** adlı doktora tezindeki bütün bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak toplanıp sunulduğunu, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

26.12.2024
Gökhan MACİT

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimime başladığım ilk günden bugüne kadar geçen süreçte desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen, zorluklarla dolu bu süreçte bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren ve olumlu motivasyonlarıyla teşvik eden ve bu noktalara ulaşmamda en büyük destekçim olan kıymetli hocam Prof. Dr. Fazıl Gökgöz'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Doktora gibi zorlu bir süreçte her zaman destekçim olan biricik eşime ve bilgi, tecrübe ve görüşleriyle çalışmama önemli katkıları olduğunu düşündüğüm değerli mesai arkadaşlarıma da ayrıca teşekkürlerimi borç biliyorum.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
TABLOLAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
KISALTMALAR LİSTESİ	vi
GİRİŞ.....	1
BİRİNCİ BÖLÜM.....	8
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE ETKİLERİ	8
1.1. İklim Değişikliği.....	8
1.1.1. İklim Değişikliğine Neden Olan Faktörler	8
1.1.2. İklim Değişikliğine İlişkin Gelecek Beklentileri	11
1.1.3. İklim Değişikliği Eylem Planları	12
1.2. Ülke ve Sektörler Açısından İklim Değişikliği ile Mücadele.....	16
İKİNCİ BÖLÜM	22
ENERJİ KAYNAKLARI.....	22
2.1. Enerji Kavramı.....	22
2.2. Enerjinin Önemi.....	22
2.3. Enerji Türleri	24
2.4. Yenilenemez Enerji	26
2.4.1. Yenilenemez Enerji Türleri ve Özellikleri.....	27
2.4.2. Yenilenemez Enerjide Güncel Trendler	32
2.4.3. Türkiye’de Yenilenemez Enerji Kaynaklarına İlişkin Değerlendirme	33
2.5. Yenilenebilir Enerji Kavramı	36
2.5.1. Yenilenebilir Enerji Türleri ve Özellikleri.....	36
2.5.2. Gelişmiş Ülkelerde Yenilenebilir Enerji Kaynakları	38
2.5.3. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları	40
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	44
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ENERJİ KAYNAKLARIYLA ETKİLEŞİMİ.....	44
3.1. İklim Değişikliğinin Enerji Kaynakları Üzerine Etkisi	44
3.1.1. İklim Değişikliğinin Yenilenemez Enerji Kaynakları Üzerine Etkisi	45
3.1.2. İklim Değişikliğinin Yenilenebilir Enerji Kaynakları Üzerine Etkisi	47
3.2. Enerji Kaynaklarının İklim Değişikliği Üzerindeki Etkisi	49
3.2.1. Yenilenemez Enerji Kaynaklarının İklim Değişikliği Üzerindeki Etkisi	49
3.2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının İklim Değişikliği Üzerindeki Etkisi	52
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM.....	53
ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ	53
4.1. Enerji Verimliliğinin Değerlendirilmesine İlişkin Nicel Analiz Yöntemleri	53
4.2. Yenilenemez Enerji Kaynakları ile Enerji Verimliliği ve Üretkenliği İlişkisi	58
4.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Enerji Verimliliği ve Üretkenliği İlişkisi	58
4.4. Enerji Politikalarının Enerji Verimliliği ve Üretkenliğine Etkisi	59
4.5. Enerji Verimliliğinin İklim Değişikliğine Etkisi	61
BEŞİNCİ BÖLÜM.....	63
ENERJİ VERİMLİLİĞİNE İLİŞKİN KARAYOLU ULAŞIMI AÇISINDAN NİCEL BİR ANALİZ.....	63
5.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi	63
5.2. Araştırmanın Evreni ve Örneklemi.....	64
5.3. Karayolu Sektöründe Verimlilik Analizine İlişkin Literatür Çalışması	68
5.4. Araştırmanın Yöntemi	74

5.5. Veri Analizi	76
5.5.1. Veriler ve Değişkenler	76
5.5.2. Tanımlayıcı İstatistikler	82
5.5.3. Ampirik Analiz ve Tartışmalar	88
SONUÇ VE ÖNERİLER	96
KAYNAKÇA.....	106
ÖZET	116
ABSTRACT	117



TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. AB-27 Ulaştırımda Modlara göre Sera Gazı Emisyonları, Uluslararası Dahil (Milyon Ton CO ₂ Eşdeğer).	65
Tablo 2. AB-27 Karayolu Ulaştırmasında Taşıt Cinsine göre Sera Gazı Emisyonları (Milyon Ton CO ₂ Eşdeğer).	67
Tablo 3. Kişi Başı GSYH (PPS) (AB-27=100).	77
Tablo 4. Model 1 İçin Veri Açıklamaları ve Kaynaklar.	78
Tablo 5. Model 1 İçin Girdiler ve Çıktılar.	78
Tablo 6. Model 2'nin 1. Aşaması İçin Veri Açıklamaları ve Kaynaklar.	80
Tablo 7. Model 2'nin 2. Aşaması İçin Veri Açıklamaları ve Kaynaklar.	81
Tablo 8. Model 2'nin 1. Aşaması İçin Girdiler ve Çıktılar.	81
Tablo 9. Model 2'nin 2. Aşaması İçin Girdiler ve Çıktılar.	81
Tablo 10. Model 1'deki Gelişmiş Ülkelerin Ortalama ve Standart Sapma Değerleri....	82
Tablo 11. Model 1'deki Gelişmekte Olan Ülkelerin Ortalama ve Standart Sapma Değerleri.	82
Tablo 12. AB-27 Modlara göre Yük Taşımacılığı Performansları.	83
Tablo 13. AB-27 Modlara göre Yolcu Taşımacılığı Performansları.	83
Tablo 14. Model 1'deki Gelişmiş Ülkelerin Karayolu Yük Taşımacılığı Performansı.	83
Tablo 15. Model 1'deki Gelişmekte Olan Ülkelerin Karayolu Yük Taşımacılığı Performansı.	84
Tablo 16. Model 1'deki Gelişmiş Ülkelerin Karayolu Yolcu Taşımacılığı Performansı.	85
Tablo 17. Model 1'deki Gelişmekte Olan Ülkelerin Karayolu Yolcu Taşımacılığı Performansı.	85
Tablo 18. Model 2'nin 1. Aşaması İçin Ülkelerin Ortalama ve Standart Sapma Değerleri.	86
Tablo 19. Model 2'nin 2. Aşaması İçin Ülkelerin Ortalama ve Standart Sapma Değerleri.	86
Tablo 20. Model 2'deki Ülkeler İçin Karayolu Yük Taşımacılığı Performansı.	87
Tablo 21. Model 2'deki Ülkeler İçin Karayolu Yolcu Taşımacılığı Performansı.	88
Tablo 22. Model 1'deki Gelişmiş Ülkelere İlişkin Süper-SBM-VZA Tekniğiyle Çevresel, Enerji ve Ekonomik Verimlilik Sonuçları.	89
Tablo 23. Model 1'deki Gelişmekte Olan Ülkelere İlişkin Süper-SBM-VZA Tekniği ile Çevre, Enerji ve Ekonomik Verimlilik Sonuçları.	89
Tablo 24. Model 1'deki Ülkelere İlişkin Modelin Verimli Çıkabilmesi İçin Gereken Ortalama Yıllık Yüzdelik Değişim.	90
Tablo 25. Model 2 1. Aşama, Gelişmiş Ülkeler İçin Süper-SBM-VZA Tekniği ile Çevresel, Enerji ve Ekonomik Verimlilik Sonuçları.	91
Tablo 26. Model 2 1. Aşama, Gelişmekte Olan Ülkeler İçin Süper-SBM-VZA Tekniği ile Çevre, Enerji ve Ekonomik Verimlilik Sonuçları.	92
Tablo 27. Model 2 2. Aşama, Gelişmiş Ülkeler İçin Süper-SBM-VZA Tekniği ile Çevresel, Enerji ve Ekonomik Verimlilik Sonuçları.	92
Tablo 28. Model 2 2. Aşama, Gelişmekte Olan Ülkeler İçin Süper-SBM-VZA Tekniği ile Çevre, Enerji ve Ekonomik Verimlilik Sonuçları.	93
Tablo 29. Model 2 1. Aşama, Ülkeler İçin Modelin Verimli Çıkabilmesi İçin Gereken Ortalama Yıllık Yüzde Değişikliği.	94
Tablo 30. Model 2 2. Aşama, Ülkeler İçin Modelin Verimli Çıkabilmesi İçin Gereken Ortalama Yıllık Yüzde Değişikliği.	95

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 2019 Yılı Sektörler Bazında Küresel Sera Gazı Emisyonları (IPCC).....	3
Şekil 2. AB-27 Ülkelerinde Ulaşım Türlerine göre Yük Taşımacılığı Yüzdeleri.	5
Şekil 3. AB-27 Ülkelerinde Ulaşım Türlerine göre Yolcu Taşımacılığı Yüzdeleri.	6
Şekil 4. AB-27 Sektörlere göre Enerji Tüketimi (%). (*)	26
Şekil 5. AB-27 Sektörlere göre Sera Gazı Emisyonu (1990=1).....	51
Şekil 6. AB-27 Ulaştırma Modlarına göre Sera Gazı Emisyonları (1990=1), Uluslararası Dahil.	66
Şekil 7. AB-27 Karayolu Ulaştırmasında Taşıt Cinslerine göre Sera Gazı Emisyonları (1990=1).	67
Şekil 8. Model 1'e Ait Görsel.....	75
Şekil 9. Model 2'ye Ait İki Aşamalı Analiz Görseli.	76



KISALTMALAR LİSTESİ

Amerika Birleşik Devletleri	ABD
Araştırma-Geliştirme	AR-GE
Avrupa Birliği	AB
Azot Oksit	N ₂ O
Banker, Charnes and Cooper	BCC
Birleşmiş Milletler	BM
Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi	BMİDÇS
Charnes, Cooper and Rhodes	CCR
Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü	OECD
Elektrik İşleri İdaresi	EİE
Enerji Bilgi Yönetim İdaresi	EIA
Fotovoltaik	PV
Gayrisafi Yurtiçi Hasıla	GSYH
Green Watts	GW
Hidrojen	H
Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli	IPCC
Karar Verme Birimi	KVB
Karbon	C
Karbon Dioksit	CO ₂
Karbon Yakalama ve Depolama	CCS
Kükürt	S
Kükürt Dioksit	SO ₂
Malmquist Productivity Index (Malmquist Üretkenlik Endeksi)	MPI

Metan	CH ₄
Multi-Criteria Decision-Making (Çok Kriterli Karar Verme)	MCDM
Nitrojen	N
Nitrojen Oksitler	NO _x
Oksijen	O
Ölçeğe Göre Sabit Getiri	ÖGSG
Proximity Indexed Value	PIV
Range of Value	RIV
Satın Alma Gücü Paritesi	PPS
Sera Gazı	GHG
Slacks Based Measure (Gevşek Tabanlı Ölçüm)	SBM
Sıvılaştırılmış Doğal Gaz	LNG
Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri	SKH
Terawatt-saat	TWh
Ton Eşdeğer Yakıt	TOE
Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası	GEPA
Uluslararası Enerji Ajansı	IEA
Veri Zarflama Analizi	VZA

GİRİŞ

Günümüz dünyasının artan enerji talebinin karşılanmasında konvansiyonel enerji kaynaklarının yanı sıra sürdürülebilir ve olumlu çevresel etkilerinden dolayı yenilenebilir enerji kaynakları da tercih edilmeye başlanmıştır. Yenilenebilir olmayan ve uzun yıllar boyunca kullanılan fosil yakıtlar yerine tükenmeyen ve tüketmeyen yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru geçişte, bu kaynakların matematiksel olarak modellenmesi ve farklı sektörlerdeki kullanımının verimliliğinin değerlendirilmesi oldukça önemli hale gelmiştir.

Sanayi sektöründe 19. yüzyılda başlayan ve 20. yüzyılda ivme kazanan gelişmeler paralelinde makineleşme ve bunun sonucu enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün katlanmıştır. 1950 yılından başlayarak 1973'lü yıllara uzanan dönem boyunca sabit seyreden petrol fiyatları, talebin öncelikle ve ağırlıklı olarak petrol ve petrol ürünlerinden karşılanması sonucunu doğurmuştur. Ancak 1973 yılında yaşanan petrol krizi öncesi 2,5 dolar seviyelerinde olan petrolün varil değeri, 1980 yılına gelindiğinde 30 dolar, günümüzde ise bu rakam 80 doların üzerine çıkmıştır (MMO, t.y.).

Özellikle fosil yakıt arzının sabit olmasına karşın nüfusla birlikte artan enerji talebi, bu tür enerji kaynaklarının politik baskı unsuru olarak kullanılmasına yol açmaktadır. Bu durum nihai tüketim içindeki payı %80 düzeyinde olan fosil yakıtlar ile çevreci grupların tartışma odağında yer alan ve enerji arzında yaklaşık %3 oranında paya sahip nükleer enerji gibi yenilenebilir olmayan kaynaklara alternatif arayışını da beraberinde getirmiştir (Karagöl ve Kavaz, 2017).

Kaynağını doğadan alan ve kendini sürekli şekilde tekrar üreten yenilenebilir enerjiyi diğer enerji kaynaklarından ayıran en önemli özellik doğal bir şekilde kendini yenileyebilmesi ve yok olmamasıdır (AREA, t.y.). Ayrıca, çevre için son derece zararlı

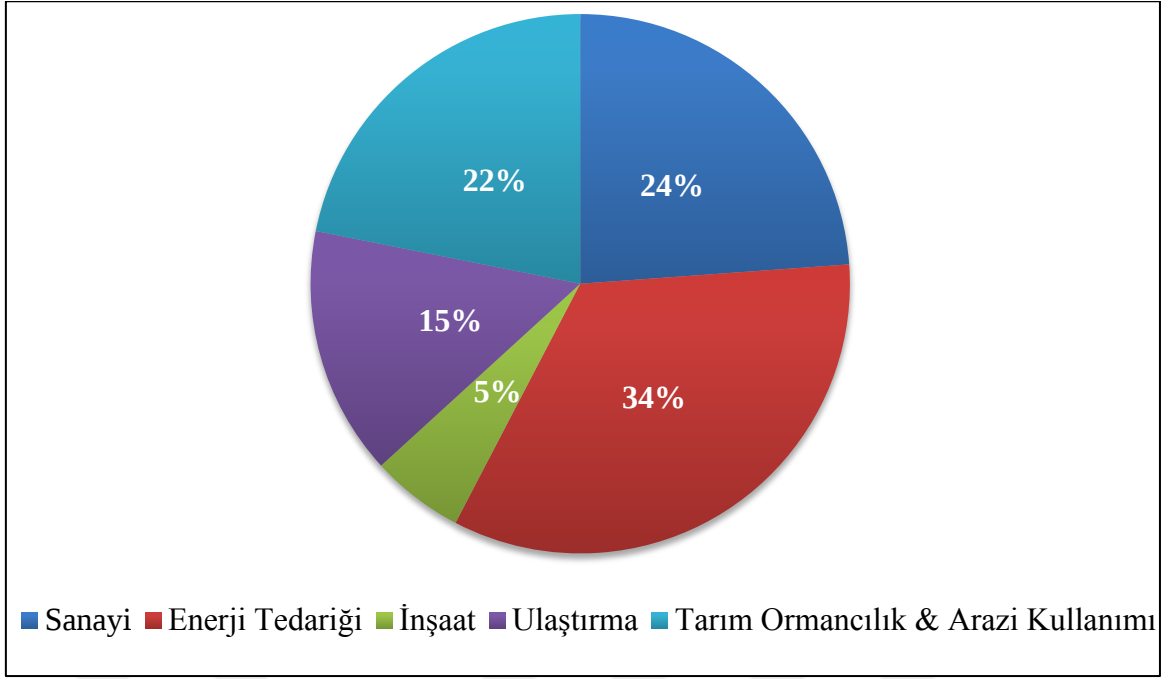
olan karbon salınımını asgari düzeye düşürmesi, bir ülkenin iç kaynaklarından elde ediliyor olması sebebiyle ithal edilmesine ihtiyaç duyulmaması, dolayısıyla enerji alanında dışa bağımlılığı azaltması, yenilenebilir enerji kaynaklarının günümüzdeki önemini daha çok arttırmıştır (Karagöl ve Kavaz, 2017).

Bu nedenle, fosil yakıtlar ve nükleer enerjinin yanı sıra rüzgâr, güneş, su, jeotermal kaynaklar, dalgalar, hidrolik kaynaklar, biokütle ve hidrojen gibi doğal kaynaklardan elde edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının analiz edilmesi, sektörel bazda yenilenemez enerji kaynaklarıyla ikame edilmesinin sağlayacağı faydaların değerlendirilmesi, mevcut ve potansiyel enerji kaynaklarının daha etkin kullanımı açısından önem arz ettiğinden literatürde birçok çalışmanın odağında yer almaktadır (Karagöl ve Kavaz, 2017).

Fosil yakıtların kullanımı sonucunda artan sera etkisi, atmosfer sıcaklığını her geçen gün yükseltmekte, küresel ısınmaya, ekosistemin bozulmasına ve beklenmedik doğa olaylarına neden olmakta, kuraklık ve aşırı yağışlar sonucu insan yaşamı olumsuz etkilenmektedir.

IPCC tarafından bildirilen 2010-2019 arası 10 yıllık dönemdeki ortalama yıllık emisyonlar, tüm sera gazı kategorileri için daha önceki herhangi bir on yılın emisyon seviyesini aşmıştır (IPCC, 2022).

2019 verilerine göre, dünya genelinde enerji sektörü %34 ile sera gazı emisyonlarının en yüksek oranından sorumlu iken sanayi %24, tarım %22, ulaştırma %15 ve inşaat %5,6'lık bir paya sahiptir.



Şekil 1. 2019 Yılı Sektörler Bazında Küresel Sera Gazı Emisyonları (IPCC).

Şekil 1'de görüldüğü üzere, ulaştırma sektörü sera gazı emisyonlarının önemli kaynaklarından biridir. Bu nedenle, toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi, elektrikli araçların teşvik edilmesi, bisiklet ve yaya ulaşımının özendirilmesi gibi adımlarla ulaşım sektöründe sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik politikalar geliştirilmesi dolayısıyla ulaşımın daha temiz ve sürdürülebilir hale getirilmesi, her geçen gün daha önemli hale gelmektedir.

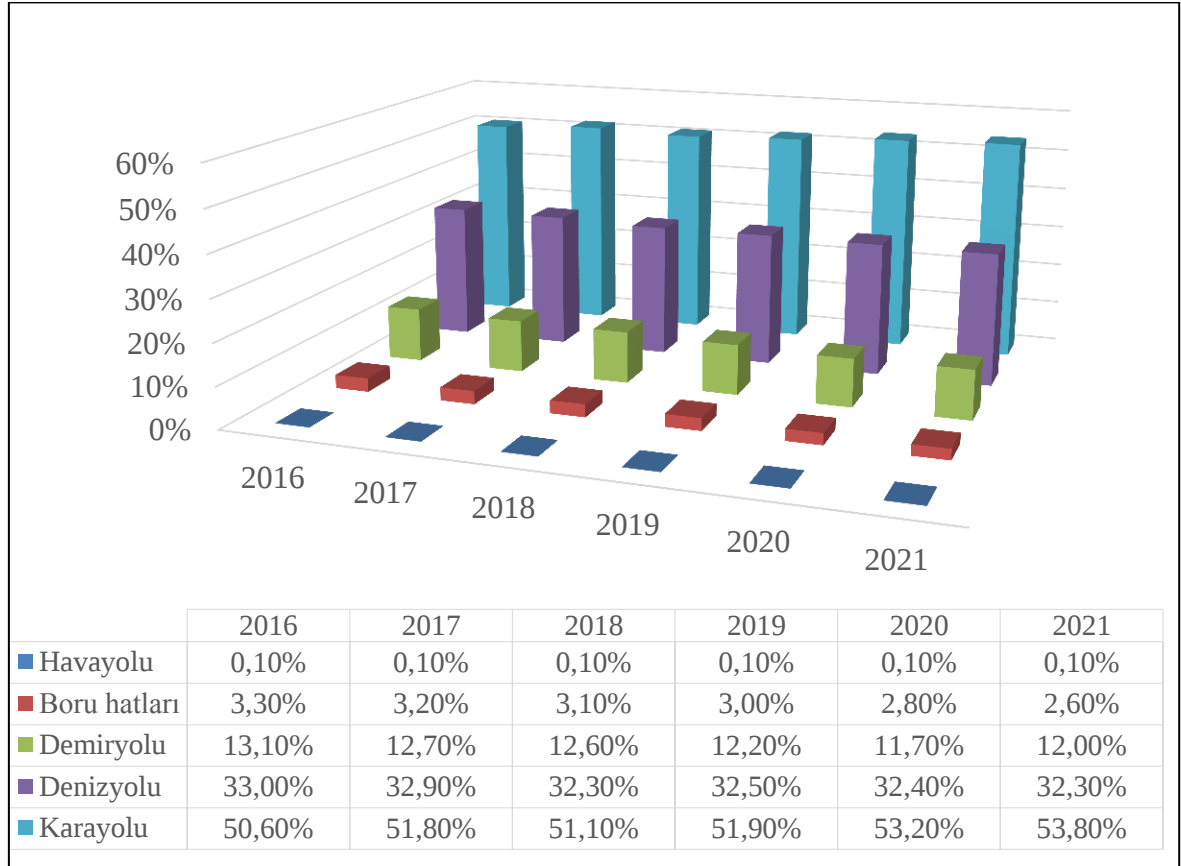
Diğer yandan atmosferdeki sera gazı emisyonlarının doğal bir sonucu olarak meydana gelen iklim değişikliği ve neden olduğu olağanüstü hava koşulları ve sıcaklıklar, tüm ulaşım türlerinin altyapısına zarar verirken ulaşım güvenliğini tehlikeye sokmakta, karayolu taşımacılığında trafik sıkışıklığına, hava ve deniz taşımacılığında işletmenin aksamasına neden olmaktadır. Bu durum; bakım, rehabilitasyon ve işletme maliyetleri ile taşımacılığın zaman maliyetinde de artışa yol açmaktadır.

Tüm bu faktörler de dikkate alınarak Avrupa Birliği'nin gelecek dönemine yönelik çok yıllık bütçesinin, çevreci yatırımlara izin verecek ve teşvik edecek yeni "Invest EU" programı kapsamında sürdürülebilir altyapı için bir çerçeve içermesi öngörülmüştür. "Invest EU", AB'nin sürdürülebilir bir iyileşme için ihtiyaç duyduğu uzun vadeli finansmanın önemli ölçüde kamu ve özel sektör kaynaklarıyla sağlanmasına yardımcı olmasına, ayrıca, Avrupa Yeşil Mutabakatı ve dijital devrim gibi AB politik hedeflerini desteklemek üzere özel sermayeden yararlanılmasını kolaylaştırmasına odaklanmaktadır. Avrupa Yeşil Mutabakat Yatırım Planı'nın önemli bir bileşeni olan "Invest EU" girişiminin, AB'nin çağdaş, kaynakları verimli kullanan, rekabetçi bir ekonominin yanı sıra adil ve gelişen bir topluma dönüşmesine de katkıda bulunması beklenmektedir (Gökgöz ve Yalçın, 2024).

Son yıllarda daha uygun maliyetli çözümler üretme noktasında popüler hale gelen enerji verimliliğinin öncelenmesi yaklaşımı enerji kaynaklarına olan talebi azaltarak ülkelerin ekonomik kalkınmasına yardımcı olmaktadır. Ulaştırma sektörünün ve özellikle karayolu taşımacılığının enerji tüketimindeki ağırlığı dikkate alındığında sektördeki enerji verimliliğinin öneminin günümüzde daha da arttığı söylenebilir. Bu bağlamda, ülkeler karayolu yolcu ve yük taşımacılığında kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltarak küresel ısınmayla mücadelede katkıda bulunabilir ve ekonomik büyümeyi destekleyebilir.

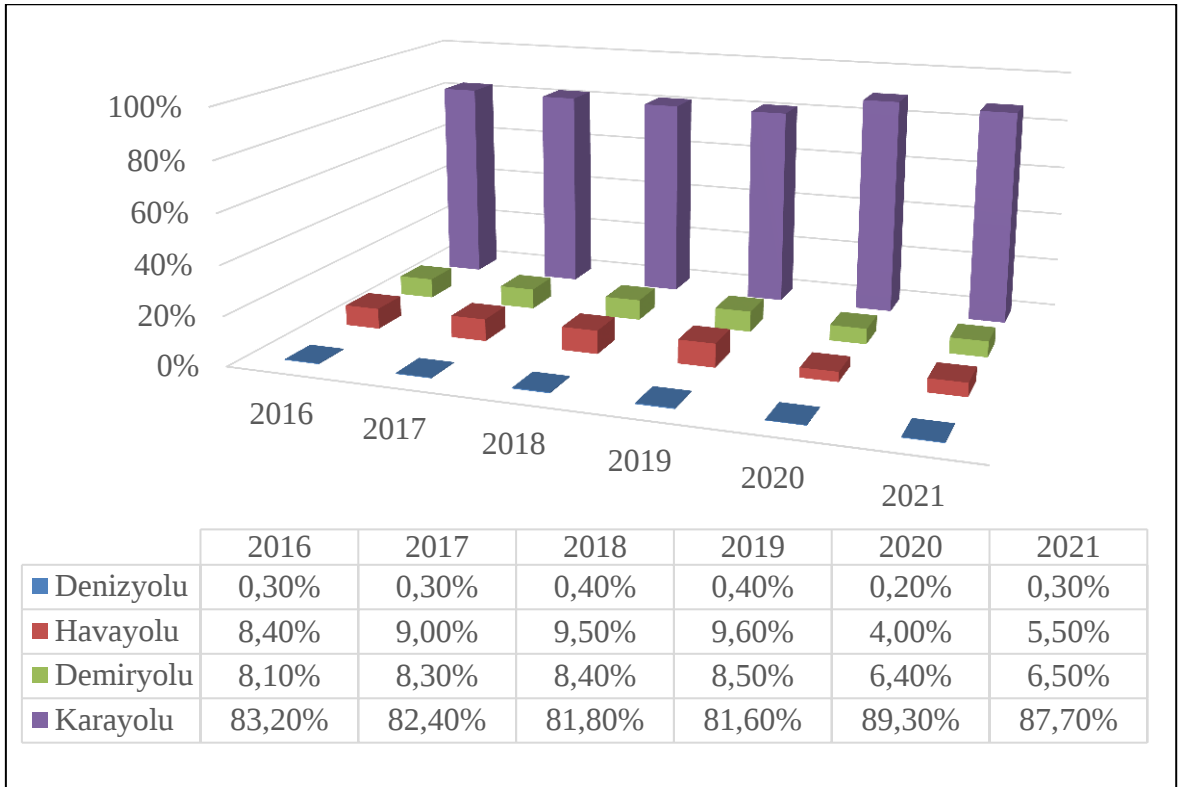
Taşımacılık sektörü, Avrupa genelinde istihdam ve ekonomi açısından hayati bir öneme sahiptir. Avrupa Komisyonu (European Commission - EC) verilerine göre, ulaştırma sektörü Avrupa GSYH'sinin %5'ini oluşturmaktadır (EC, 2021). Ayrıca Eurostat, 2021 yılında ulaştırma sektöründe 6 milyon kişinin istihdam edildiğini ve bunun AB'deki toplam işgücünün %3,1'ini oluşturduğunu belirtmektedir. Ulaştırma sektöründe çalışanların %89,6'sı kara taşımacılığında (karayolu veya demiryolu),

%5,7'si havayolu taşımacılığında ve %4,7'si her türlü su (deniz, nehir vb.) taşımacılığında çalışmaktadır (Eurostat, 2021). Bu veriler ışığında, ulaştırma sektörünün önemli sosyal ve ekonomik etkilerinin olduğu görülmekte olup bu sektörün sürdürülebilir ve verimli bir şekilde faaliyet göstermesinin büyük önem taşıdığı değerlendirilmektedir.



Şekil 2. AB-27 Ülkelerinde Ulaşım Türlerine göre Yük Taşımacılığı Yüzdeleri.

Şekil 2 ve Şekil 3'te, AB ülkelerindeki ulaşım türlerine göre taşımacılık yüzdelere yer verilmiştir. Görüldüğü üzere karayolu taşımacılığı yük ve yolcu taşımacılığında en büyük paya sahiptir.



Şekil 3. AB-27 Ülkelerinde Ulaşım Türlerine göre Yolcu Taşımacılığı Yüzdeleri.

Bu noktadan hareketle bu çalışmada; “AB ülkelerinin, hareketlilik verilerini girdi olarak ve enerji kullanımını, sera gazı emisyonlarını ve karayolu sektörü işletmelerinin toplam gelirini çıktı olarak nicel hale getirip karayolu yük ve yolcu taşımacılığı hareketlilik açısından nasıl bir performans göstermektedir?, AB ülkeleri arasında karayolu sektörünün çevre, enerji ve ekonomik verimliliğine göre anlamlı bir fark var mıdır?” sorularının cevapları araştırılmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde iklim değişikliği ve etkileri, ikinci bölümünde ise enerji kaynakları hakkında genel bilgilere yer verilmiştir. Üçüncü bölümde iklim değişikliği ile enerji kaynakları arasındaki ilişkin kısaca özetlendikten sonra dördüncü bölümde enerji verimliliği perspektifinden iklim değişikliği konusu ele alınmıştır. Tezin beşinci bölümünde karayolu ulaştırması açısından nicel bir analiz yürütülerek Avrupa

Birliği ÷lkelerinde enerji verimliliği analiz edilmiş ve son b÷l÷mde bu sonuçlar çerçevesinde değerlendirmelere ve politika önerilerine yer verilmiştir.



BİRİNCİ BÖLÜM

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE ETKİLERİ

1.1. İklim Değişikliği

Günümüz dünyası hızlı bir değişim ve dönüşüm sürecinin içinde bulunmaktadır. Belirli bölgelerde sınırlı düzeyde kalsa da Dünyamızın nüfusu genel olarak hızla artmakta, bu artış halihazırda son derece kısıtlı olan dünya kaynakları üzerindeki baskıyı arttırmaktadır. İnsan hareketliliğinin yükseldiği küreselleşen dünyada, tarım, sanayi, turizm, ticaret gibi alanlardaki faaliyetlerin çevre üzerinde olan etkileri daha derin ve olumsuz bir şekilde hissedilmektedir. Bu hareketliliğin doğal bir sonucu olan iklim değişikliğine karşı kişisel, toplumsal ve politik tedbirlerin belirlenmesi ve uygulamaya konulması daha önemli bir hale gelmiştir.

Dünya'nın iklimi hızlı bir şekilde değişmekte ve bu etkiler günümüzde belirgin şekilde hissedilmektedir. Bilimsel veriler endüstri öncesi dönemlere göre atmosferin sıcaklığının bir derece arttığını ve bu artışın devam edeceğini göstermektedir. Ayrıca küresel ısınmanın kuraklık, sel, yangın, fırtına ve şiddetli kasırgalar gibi hava olaylarının şiddetini ve gerçekleşme sıklığını arttırdığı yönünde önemli kanıtlar bulunmaktadır.

İklim değişikliğinin olası etkilerine karşı önlemler alınarak sera gazı emisyonları belirgin ölçüde azaltılsa bile yıllar boyunca atmosferde oluşan emisyon salınımı ve diğer olumsuz çevresel etkilerin atmosferden arınmasının uzun yıllar süreceği, küresel ısınma ve etkilerinin onlarca yıl hissedilmeye devam edeceği değerlendirilmektedir.

1.1.1. İklim Değişikliğine Neden Olan Faktörler

Yerkürenin oluşumundan günümüze kadar geçen süreç boyunca yaşanan iklim değişiklikleri; yeryüzü şekillerinden, toprak ve bitki örtüsüne, yüzey ve yeraltı

sularından ekosisteme kadar Dünya'nın fiziki görünümünde önemli değişikliklere neden olmuştur.

İklim değişikliği; ısıyı hapseden sera gazlarının atmosferdeki miktarının insan etkinlikleri ve doğal faktörler etkisiyle artması, yıllık sıcaklık ortalamalarının yükselmesi ve bunun bir sonucu olarak olumsuz ve anormal atmosferik olaylarla karşılaşılması şeklinde açıklanmaktadır. Bir başka ifadeyle doğaya salınan sera gazları, ormansızlaşma gibi diğer olumsuz etkenlerle birleşerek canlı yaşamını tehdit eden küresel iklim değişikliğine neden olmaktadır.

Hava içinde yer alan gazların kompozisyonu zamandan zamana ve bölgeden bölgeye değişmekle birlikte hava ve iklim üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bu gazlardan iklim değişikliği üzerine en olumsuz etkileri olan sera gazları doğal sistemler ve insan kaynaklı aktivitelerden kaynaklanmaktadır.

Doğal kaynaklardan salınan sera gazlarını; orman yangınları, okyanus hareketleri, sulak alanlar ve volkanik patlamalardan gelen emisyonlar oluştururken insan kaynaklı sera gazları ise; çoğunlukla fosil yakıtların kullanılması, sanayi, ormansızlaşma, tarımsal etkinlikler ve karbon salımı gibi aktiviteler sonucunda ortaya çıkmaktadır.

İklim değişikliğine neden olan faaliyet alanları ve faktörler şu şekilde özetlenebilir:

- Fosil Yakıt Kullanımı: Kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil kaynaklı yakıtların tüketilmesi sera gazı emisyonlarının başlıca kaynaklarından biridir. Bu emisyonlar özellikle enerji üretimi, ısınma ve elektrik üretimi gibi alanlarda yoğun olarak ortaya çıkar.

- Ormancılık ve Tarım Uygulamaları: Ormanların kesilmesi, ormansızlaşma ve tarım alanlarının genişlemesi, karbon emilimini azaltır ve atmosfere daha fazla CO₂ salınımına yol açar. Ayrıca, endüstriyel tarım uygulamaları, toprak erozyonuna ve toprak kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır.
- Sanayi Emisyonları: Sanayi tesislerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları, özellikle enerji, çimento ve demir-çelik üretimi ile kimya endüstrisi gibi sektörlerde yoğun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tesisler genellikle karbondioksit, metan, azot oksitleri ve diğer sera gazlarını atmosfere salmaktadır.
- Doğal Süreçler: Yanardağ patlamaları, orman yangınları, erozyon ve buzulların erimesi gibi doğal olaylar, atmosfere sera gazları ve diğer iklim değişikliği etkenlerinin salınımına neden olmaktadır. Ancak, insan etkisinin doğal süreçlerle karşılaştırıldığında daha belirgin olduğu kabul edilmektedir.
- Ulaşım: Motorlu araçların ve taşımacılık sektörünün karbondioksit emisyonları ile metan ve nitrojen oksit emisyonları küresel ısınmayı arttırmaktadır. Trafik sıkışıklığı, araçların daha uzun sürelerde daha fazla yakıt tüketmesine neden olmakta ve bu durum daha fazla CO₂ emisyonu anlamına gelmektedir. Ayrıca ulaşım altyapısının yapımı, yeni yollar ve demiryolu hatları gibi projeler için ormanların kesilmesi karbon depolayan ekosistemlerin kaybına yol açmaktadır. Ulaşım sektörünün iklim değişikliği üzerindeki bu etkileri göz önüne alındığında, sürdürülebilir ulaşım çözümleri ve alternatif enerji kaynakları gibi stratejilerin benimsenmesi önem arz etmektedir. Elektrikli ve hibrit araçlar, toplu taşıma sistemlerinin

geliştirilmesi ve kullanılması ile bisiklet yollarının artırılması gibi adımlar sera gazı emisyonlarını azaltmaya yardımcı olacak niteliklerden bazılarıdır.

- Hava Kirliliği: Sera gazları dışında, endüstriyel ve evsel faaliyetlerden kaynaklanan diğer kirleticiler de iklim değişikliğine katkıda bulunabilmektedir. Örneğin ozon, partikül madde ve karbon monoksit gibi kirleticiler atmosferdeki ısınma etkisini arttırmakta ve hava kalitesini bozmaktadır.

Bu faktörlerin tümü, iklim değişikliğinin karmaşık ve çok yönlü bir sorun olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, iklim değişikliği ile mücadele etmek için geniş kapsamlı stratejilerin benimsenmesi kaçınılmaz bir gerekliliktir.

1.1.2. İklim Değişikliğine İlişkin Gelecek Beklentileri

Küresel iklim değişikliği önümüzdeki yıllarda çok çeşitli etkilere neden olacak karmaşık bir süreçtir. İklim değişikliğinin gelecekteki etkilerini tahmin etmek amacıyla bilimsel araştırmalar ve modellerden yararlanılarak ulaşılan bazı sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Artan Sıcaklık: Dünya genelindeki ortalama sıcaklık artışının devam edeceği beklenmektedir. Bu artış, daha sıcak yazlar, daha ılıman kışlar ve aşırı sıcak dalgaları gibi olaylara neden olmakta ve kutup bölgelerindeki buzulların erimesi hızlanmaktadır.
- Ekstrem Hava Olayları: İklim değişikliği şiddetli hava olaylarının sıklığını ve yoğunluğunu artırmakta olup bu durum daha sık ve daha yoğun kasırgalar, şiddetli yağışlar, kuraklık ve sellerin yaşanmasına neden olmaktadır.

- Deniz Seviyesinin Yükselmesi: Kutup buzullarının erimesi ve deniz suyunun termal genişmesi, deniz seviyesinin yükselmesine neden olmakta ve kıyı bölgelerinde erozyon, tuzlu su baskınları ve habitat kaybı gibi sorunlara yol açmaktadır.
- Ekosistem Değişiklikleri: İklim değişikliği, doğal ekosistemlerde önemli değişikliklere neden olmakta ve bu durum türlerin göç etmesi, habitatların kaybı ve biyolojik çeşitlilikte azalma gibi sonuçlara yol açmaktadır.
- Tarımsal Etkiler: Değişen iklim koşulları, tarımı olumsuz etkilemekte olup kuraklık, sel, hastalık ve zararlılar gibi faktörler, tarım verimliliğini azaltmakta ve gıda güvenliğini tehdit etmektedir.
- Sosyal ve Ekonomik Etkiler: İklim değişikliği, toplumlar üzerinde önemli sosyal ve ekonomik baskılar yaratmaktadır. Göç hareketlerinin artması, gıda ve su kaynaklarına erişimde yaşanan zorluklar, sağlık sorunları ve ekonomik kayıplar gibi etkiler görülebilmektedir.

Bu etkiler bugün ve gelecekte, iklim değişikliğiyle mücadele etmek için daha kapsamlı ve etkili politika ve uygulamaların benimsenmesini gerektirmektedir. Sürdürülebilir enerji kullanımı, sera gazı emisyonlarının azaltılması, ekosistemlerin korunması ve toplumların uyum sağlamasını destekleyen önlemler bu süreçte önemli rol oynamaktadır.

1.1.3. İklim Değişikliği Eylem Planları

İklim değişikliğinin olumsuz etkilerini asgari düzeye çekmek için oluşturulan eylem planları hükümetler, uluslararası kuruluşlar, sivil toplum örgütleri ve özel sektör tarafından yürütülen çeşitli politika ve programlardan oluşmaktadır. Her ülkenin ve

bölgenin iklim değışikliğı ile mücadele stratejileri kendi önceliklerine ve ihtiyaçlarına göre farklılık göstermekle birlikte eylem planlarında genel olarak ele alınan temel bileşenler; sera gazı azaltımı, sürdürülebilir enerji dönüşümü, orman ve ekosistem koruma, ulaşım dönüşümü, uyum stratejileri ve uluslararası iş birliği ve anlaşmalardır. Eylem Planlarında yer alan bileşenler aşağıdaki açıklamalar doğrultusunda detaylandırılabilir:

- Sera Gazı Azaltımı: İklim değışikliğine neden olan ana faktörlerden biri, atmosfere salınan sera gazlarının miktarındaki artıştır. Bu nedenle, eylem planlarının birçoğı sera gazı emisyonlarını azaltmaya odaklanmaktadır. Söz konusu eylem planları yenilenebilir enerji kullanımının teşvik edilmesi, enerji verimliliğinin artırılması, endüstriyel süreçlerin iyileştirilmesi ve sera gazı emisyonlarının izlenmesi ve raporlanması gibi çeşitli önlemler içermektedir.
- Sürdürülebilir Enerji Dönüşümü: Fosil yakıtlardan temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, iklim değışikliği ile mücadelede önemli bir stratejidir. Bu; güneş, rüzgar, hidroelektrik, jeotermal ve biyoenerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmeyi, fosil yakıtların kullanımını azaltmayı ve enerji sistemlerini daha verimli hale getirmeyi içermektedir.
- Orman ve Ekosistem Koruma: Ormanlar ve diğer doğal ekosistemler, karbon depolamanın ve biyolojik çeşitliliğın önemli bir parçasıdır. Bu nedenle, ormanların korunması, ormansızlaşmanın önlenmesi ve ağaçlandırma gibi önlemler iklim değışikliği eylem planlarının bir parçasıdır.

- Ulaşım Dönüşümü: Ulaşım sektörü, sera gazı emisyonlarının önemli bir kaynağı olduğundan toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi, elektrikli araçlar kullanımı ile bisiklet ve yaya ulaşımının teşvik edilmesi gibi adımlar, ulaşımın daha temiz ve sürdürülebilir hale getirilmesini hedeflemektedir.
- Uyum Stratejileri: İklim değişikliğinin bazı etkilerinden kaçınılması mümkün değildir. Bu nedenle, eylem planları genellikle iklim değişikliğine adapte olmak için uyum stratejileri içermektedir. Bu stratejiler su yönetimi, tarım uygulamaları, kıyı koruma, sağlık hizmetleri ve altyapı iyileştirmeleri gibi alanları kapsamaktadır.
- Uluslararası İşbirliği ve Anlaşmalar: İklim değişikliği küresel bir sorun olduğundan uluslararası düzeyde koordineli ve etkili bir yaklaşım gerektirmektedir. İklim değişikliğine uyum uluslararası platformda 2000’li yılların başından itibaren tartışılmaya başlanmış ancak iklim değişikliği ile mücadelenin önemi Paris Antlaşması'yla net bir şekilde vurgulanmıştır.

İklim değişikliğiyle yapılacak mücadele hususunda ilk ciddi adım Dünya Meteoroloji Örgütü’nün önderliğinde 1979 yılında düzenlenmiş olan Birinci Dünya İklim Konferansı’nda atılmıştır. Bu konferansta özetle; temel enerji kaynağı olarak fosil yakıtlara olan uzun süreli bağımlılık ve orman alanlarının gün geçtikçe azalması trendinin gelecekte de devam etmesi halinde atmosferdeki karbondioksit birikiminin büyük ölçüde artacağı ve artan bu birikimin iklim üzerindeki olumsuz etkisinin uzun süreli olacağı ifade edilmiştir.

Bu konuda alınacak tedbirlere ilişkin en önemli uluslararası iklim anlaşmalarından birisi de “Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi”dir (BMİDÇS). Bu sözleşme 80’lerin sonunda hükümetler arası konferanslarda uzunca bir

süre müzakere edilmiş, 1992 yılında Rio’da gerçekleştirilen Yeryüzü Zirvesi’nde imzaya açılmıştır. BMİDÇS, global iklimi korumaya ve sera gazı salınımını azaltmaya dair genel ilkeleri, eylem stratejilerini ve sorumlulukları düzenleyen bir sözleşmedir. Bu sözleşme ile beşeri sera gazı salınımının sınırlandırılması ve sera gazı yutak alanlarının korunması amacıyla her bir ülkenin ulusal politikalar benimsemesi ve uygun önlemler almasına yönelik yükümlülükler getirilmiştir.

İklim değişikliği ile mücadele konusunda izlenecek adımların somutlaştırıldığı ilk anlaşma, 1997 yılında imzalanan ve 2005 yılında yürürlüğe giren Kyoto Protokolü’dür. Bu Protokolle belirlenen sayısallaştırılmış emisyon azaltım hedefleri, tolerans gösterilebilecek sınırlar ve uyumsuzluk halinde uygulanacak yaptırımlar, diğer uluslararası çevre sözleşmelerinden Protokolü farklı kılan en önemli özellikler arasındadır. Ülkemiz ise 26 Ağustos 2009 tarihinde bu Protokolün tarafı olmuştur.

Kyoto Protokolünün sona erme tarihi olan 2020 sonrası iklim değişikliği ile ilgili konuları düzenlemek amacıyla, BMİDÇS esaslarına dayalı olarak Paris Anlaşması yürürlüğe girmiştir. Bu anlaşma ile iklim değişikliği tehlikesine karşı global sosyo-ekonomik dirençliliğin arttırması amacıyla aralarında fosil yakıt kullanımının azaltılarak yenilenebilir enerjiye yönelim gibi konuları da içeren tedbirlerin alınması ve nihayetinde küresel sıcaklık artışının 2°C’nin altında (mümkünse 1,5°C derece seviyesinde) tutulması hedeflenmiştir.

Ülkemiz bu anlaşmanın 2021 yılında tarafı olmuş Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca 2053 net sıfır emisyon ve yeşil kalkınma hedefleri belirlenmiş ve Bakanlığın bağlı kuruluşu olan İklim Değişikliği Başkanlığı tarafından bu hedefleri hayata geçirecek planları ve politikaları belirlemek için çalışmalar başlatılmıştır.

Bu kapsamda, sırasıyla Ulusal İklim Değişikliği Stratejisi (2010 -2023), Ulusal İklim Değişikliği Eylem Planı (2011-2023) ve Ulusal İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2011- 2023) adıyla temel strateji belgeleri yürürlüğe konulmuştur.

1.2. Ülke ve Sektörler Açısından İklim Değişikliği ile Mücadele

Enerji kaynaklarının iklim değişikliğiyle mücadele ve karbonsuzlaştırma politikalarına etkileri aşağıda kısaca ifade edilmiştir.

- Temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara kıyasla daha az sera gazı emisyonu ürettiğinden küresel ısınmanın etkilerini hafifletmektedir.
- Temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları hava kalitesinin iyileştirilmesinde ve toplum sağlığının korunmasında etkilidir.
- Yenilenebilir enerji projeleri, enerji verimliliği uygulamaları ve diğer karbonsuzlaştırma çabaları, istihdamı ve ekonomik büyümeyi desteklemektedir.
- Fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması enerji güvenliğini arttırmakta ve yenilenebilir enerji kaynakları yerel olarak bulunabildiğinden kullanılmaları enerji arzının istikrarını sağlamaktadır.

Diğer yandan ülkelerin ekonomik durumları ile coğrafi ve demografik özellikleri kullanılan enerjinin türünü ve verimliliğini etkilemektedir. Ekonomik sorunlar yaşayan ülkeler, temiz enerji geçişini finanse etmekte zorlandığından bu ülkelerin iklim değişikliğiyle mücadele konusunda uluslararası yardım ve işbirliğine ihtiyaçları bulunmaktadır.

Coğrafi özelliklerinden dolayı güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan daha fazla faydalanan ülkelerin, bu kaynakları daha verimli kullanarak iklim değişikliğiyle mücadelede liderlik edebilme potansiyeli çok yüksektir.

Su kaynaklarına erişim potansiyeli yüksek olan ülkeler hidroelektrik enerjiyi diğerlerinden daha fazla kullanabilmektedir. Yoğun nüfusa sahip ülkeler, enerji verimliliği ve karbonsuzlaştırma politikalarının uygulanmasında daha fazla zorluklarla karşılaşabilmektedir.

Benzer şekilde sektörlerin iklim değişikliği üzerindeki etkileri oldukça fazladır. Sektörel olarak alınan önlemler iklim değişikliğini sınırlamada oldukça etkilidir.

Enerji sektöründe fosil yakıt kullanımı sera gazı emisyonlarını artırırken; güneş, rüzgar, hidroelektrik ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ise sera gazı emisyonlarını azaltmaya yardımcı olmaktadır. Ayrıca endüstriyel tesislerde ve evlerde enerji verimliliğinin artırılması da sera gazı emisyonlarının azaltılmasında etkili olmaktadır.

Ulaşım sektöründe benzin ve dizel gibi fosil yakıtların kullanımı sera gazı emisyonlarını arttırmakta, elektrikli ve hibrit araçların kullanımı ise sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır. Toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi ve bisiklet yollarının artırılması karbon salınımını azaltmaktadır.

Ülkemizde ulaşım sektöründe iklim değişikliği ile mücadele 2053 Ulaştırma ve Lojistik Ana Planında yer almıştır. Bu planda ulaşım sektöründeki sorunlar çeşitli senaryolar ile ele alınmış olup bu senaryolardan biri de Çevreci (Sürdürülebilir) senaryodur. Senaryo ile çevresel ve toplumsal hassasiyetler öncelikle dikkate alınmış, çok ölçütlü değerlendirme çalışmasında üst politika belgeleri olarak Kalkınma Planları,

Türkiye Ulaştırma Politika Belgesi, İklim Değişikliği Eylem Planı ve 12. Ulaştırma ve Haberleşme Şûrası Sonuç Bildirisi'nde yer alan ulaştırma ve lojistik faaliyetler ile ilgili kararlar göz önünde bulundurulmuştur.

Ana Planda; çevre konularına öncelik veren bir ulaştırma sisteminin yapılandırılması vizyonu benimsenmiş, ulaşım ve lojistik yatırım ve faaliyetlerinde doğal, kültürel ve tarihi varlıklar ile çevrenin korunması, iklim değişikliğine karşı önlemler alınması, ulaşım sektöründe enerji verimliliğinin artırılması kapsamında Avrupa Birliği Beyaz Kitabı, Paris İklim Anlaşması, Avrupa Yeşil Mutabakatı, Avrupa İklim Yasası çerçevesinde hareket edilmesi, yeşil ulaşım ve lojistik yatırım ve uygulamalarının geliştirilmesi ve sürdürülmesi amaçlanmıştır.

Karayolu yolcu ve yük taşımacılığı hizmetlerinin geliştirilme politikası kapsamında artan taşıt ve otomobil sahipliği ile yolcu ve yük hareketliliğine bağlı olarak oluşması beklenen trafik sıkışıklığı, sera gazı salınımları ve gürültü kirliliğinin, ülkemizin de içinde bulunduğu iklim değişikliğine ilişkin anlaşmalar çerçevesinde asgari düzeylere çekilmesi hedeflenmiştir.

Olumsuz çevresel etkilerin adil ve şeffaf ölçütlere dayalı olarak bu olumsuzluğu oluşturanlar tarafından karşılanması için “Kirleten Öder” ilkesinin uygulanması, lojistik kaynaklı sera gazı emisyonu ve hava kirliliğinin azaltılması, sera gazı emisyonunun istenen düzeylerde tutulabilmesi için karbon ayak izi tespiti, karbon vergilendirmesi, emisyon ticareti gibi sistemlerin kullanılması, çevresel hassasiyet kapsamında uluslararası anlaşmalara uyum sağlanması gerekliliği ile taşıma filosunun yenilenerek çevre dostu taşıtların teşvikine yönelik bir bakış ortaya konulmuştur.

Ulaşım ve lojistikte çevre duyarlılığının sağlanması ve enerji verimliliğinin artırılması için yenilenebilir enerji üretimi ve kullanımının teşvik edilmesi, petrole

bağımlılığı azaltarak maliyet odaklı enerji verimliliğinin artırılması, çevresel duyarlılık için ulaşım türleri arasında en uygun dengeye ulaşılması, olumsuz çevresel etkilerin oluşturanlar tarafından ödenmesi kuralının uygulanması hedeflenmektedir.

Tarım ve ormancılık sektöründe; ormanların kesilmesi karbon emisyonlarını arttırmakta, endüstriyel tarım uygulamaları, toprak erozyonuna ve karbon salınımına yol açmaktadır. Sürdürülebilir tarım uygulamaları ve ormancılık yöntemleri ise karbon emisyonlarını azaltırken biyoçeşitliliği korumaktadır.

Sanayi sektöründe; sanayi tesislerinden kaynaklanan karbon salınımı, sera gazı emisyonlarını artırırken temiz üretim teknolojileri ve süreçleri endüstriyel emisyonları azaltmaktadır.

İnşaat ve altyapı sektöründe enerji verimli bina standartlarının benimsenmesi ve altyapı projelerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır.

Benzer şekilde iklim değişikliğinin sektörler üzerindeki olumsuz etkileri bulunmaktadır. Sektörlerin iklim değişikliğinden etkilenme şekilleri birbirinden farklıdır. Bu sektörlerin her biri, iklim değişikliğinin etkileriyle başa çıkmak ve uyum sağlamak için özel stratejiler belirlemeli ve önlemler alarak sektörel riskleri azaltmalıdır. Bu kapsamdaki değerlendirmeler şunlardır:

- Tarım: Kuraklık, seller, artan sıcaklık ve değişen yağış rejimleri, tarım verimliliğini azaltabilmekte, tarım alanlarında zararlılar ve hastalıkların yayılmasını teşvik edebilmektedir. Bu durum gıda güvenliğini tehdit etmekte, ürün kayıplarına, su kaynaklarının azalmasına, kirlenmesine ve su kalitesinin düşmesine neden olabilmektedir.

- Enerji: İklim değışikliğı enerji kaynaklarının verimliliğı ve üretkenliğı üzerinde oldukça etkilidir. İklim değışikliğı, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının daha sık ve şiddetli hava olaylarına maruz kalmasına neden olabilmektedir. Artan rüzgar hızları, rüzgar türbinlerinin daha fazla elektrik üretmesine yol açabilmektedir. Ancak, kuraklık ve su kıtlığı hidroelektrik santrallerin verimliliğini azaltabilmekte ve hidroelektrik enerji üretimini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Artan sıcaklık ve değışen yağış rejimleri, fosil yakıt kaynaklarına erişimi etkileyebilmektedir. Ayrıca bu durum, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların çıkarılması ve işlenmesi için gereken altyapı üzerinde de sonuçlar doğurmaktadır.

İklim değışikliğı, nükleer enerji tesislerinin su kaynaklarına erişimini güçleştirirken kuraklık, nükleer enerji tesislerinin soğutma sistemlerini etkileyebilmekte ve tesislerin verimliliğini azaltabilmektedir.

Ayrıca, iklim değışikliğı, nükleer atık depolama ve bertarafı için gereken altyapıyı da etkileyebilmektedir. Deniz seviyesinin yükselmesi, kıyı bölgelerindeki nükleer atık depolama tesislerini tehdit edebilmektedir.

- Ulaşım: İklim değışikliğinden dolayı meydana gelen aşırı sıcaklıklar ve anormal hava olayları karayolu, demiryolu, havayolu ve deniz yolu gibi tüm ulaşım türlerinin altyapısına zarar verebilmekte ve ulaşım güvenliğini tehlikeye sokabilmektedir. Ayrıca karayolunda trafik sıkışıklığına, havayolu ve denizyolu ulaşımında ise operasyonel aksamalara neden olabilmektedir. Bu durum ulaşımın bakım, onarım ve işletme maliyeti ile zaman maliyetini arttırmaktadır.

İklim değişikliğinin etkileri ulaştırma sektörünün çeşitli alt kollarında farklı şekillerde görülebilmekte ve sektörün dayanıklılığını ve uyum kabiliyetini etkileyebilmektedir. Ulaştırma sektöründe iklim değişikliğiyle başa çıkabilmek için daha dirençli altyapılar inşa etmek ve daha verimli taşıma sistemleri oluşturmak önemlidir.

- Sağlık: Artan sıcaklıklar, bununla ilişkili hastalıkların (örneğin, sıcak çarpması, dehidrasyon) ortaya çıkmasını ve bulaşıcı hastalıkların yayılmasını artırabilmektedir.
- Turizm: Artan sıcaklık ve ekstrem hava olayları (kasırgalar, seller gibi doğal afetler) turizm merkezlerini olumsuz yönde etkileyerek turizm gelirlerini azaltabilmektedir. İklim değişikliğinden dolayı deniz seviyesinin yükselmesi ve ekosistemlerdeki değişiklikler turistik alanlara ve doğal çevreye zarar verebilmektedir.

İKİNCİ BÖLÜM

ENERJİ KAYNAKLARI

2.1. Enerji Kavramı

Enerji, modern toplumların temel ihtiyaçlarından biri olup devletlerin ekonomik, endüstriyel ve savunma alanlarında faaliyet göstermeleri için kritik önem taşımaktadır. Enerji kaynakları, genel olarak yenilenemez ve yenilenebilir olarak iki başlıkta sınıflandırılır.

Yenilenemez enerji kaynakları, fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğalgaz) ve nükleer yakıtları (uranyum, toryum) içerir. Fosil yakıtlar, milyonlarca yıl süren doğal süreçler sonucu oluşmuş ve zamanla tükenme eğiliminde olan kaynaklardır. Nükleer yakıtlar ise çekirdek reaksiyonlarıyla enerji üreten ancak radyoaktif atıklarla ilgili önemli çevresel ve güvenlik sorunları bulunan kaynaklardır (Koç ve Şenel, 2013).

Yenilenebilir enerji kaynakları ise güneş, rüzgâr, su ve biyokütle gibi doğal kaynaklardan elde edilen enerjiyi ifade eder ve bu kaynaklar doğal süreçlerle sürekli olarak yenilenebilir ve çevre dostudur.

Günümüzde fosil yakıtlar düşük maliyetleri, kolay erişimi ve mevcut altyapıları nedeniyle hala yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak, fosil yakıtların çevresel etkileri (örneğin, sera gazı emisyonları) ve sınırlı rezervleri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi ve talep giderek artış göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlayarak gelecekteki enerji ihtiyaçlarını karşılamak için önemli bir rol oynamaktadır.

2.2. Enerjinin Önemi

Enerji, modern toplumların işleyişinde temel bir gereksinimdir ve ekonomik büyüme, endüstriyel üretim, ulaşım ve yaşam kalitesi gibi birçok alanı etkileyen kritik

bir kaynaktır. Enerji, doğal kaynaklardan elde edilerek işlenebilir ve kullanılabilir hale getirilen bir formda, ekonomik ve sosyal faaliyetlerin temel taşı olarak görülmektedir.

Günümüzde, enerji kaynaklarının kullanımı ve dağılımı, küresel ölçekte ekonomik ve siyasi dinamiklerin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Fosil yakıtların (kömür, petrol, doğalgaz) yaygın kullanımı, endüstriyel devrimle birlikte insanlığın yaşam standardını önemli ölçüde arttırmıştır. Ancak, fosil yakıtların sınırlı rezervleri ve çevresel etkileri, özellikle iklim değişikliği ve çevreye olan olumsuz etkileri açısından ciddi endişelere yol açmaktadır.

Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynakları giderek artan bir öneme sahiptir. Güneş, rüzgâr, su ve biyokütle gibi doğal kaynaklardan elde edilen enerji, sürdürülebilirlik ve çevresel uyum açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Güneş enerjisi, güneş panelleri aracılığıyla elektrik üretiminde kullanılarak karbon salınımını azaltmaya yardımcı olurken; rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbinleriyle elektrik enerjisine dönüştürülerek temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağı sağlamaktadır.

Sürdürülebilir enerji kaynakları, doğal kaynakların etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını teşvik ederken, çevresel etkileri minimize ederek gelecek nesillerin yaşam kalitesini korumayı hedeflemektedir. Ayrıca, yenilenebilir enerji teknolojileri, ekonomik kalkınmayı destekleyerek istihdam olanakları yaratmakta ve enerji güvenliğini artırmaktadır.

Enerji politikaları, uluslararası iş birlikleri ve teknolojik yenilikler, enerji sektörünün dönüşümünde kritik bir rol oynamaktadır. Gelecekte, enerji kaynaklarının daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde kullanılması için politika yapıcıların, endüstrinin ve akademisyenlerin iş birliği ve çabaları büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, enerji kaynakları modern toplumların gelişiminde ve refahında kilit bir faktördür. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması, enerji sektörünün çevresel etkilerini azaltarak gelecek nesiller için daha sürdürülebilir bir dünya yaratmada önemli bir adım olacaktır.

2.3. Enerji Türleri

Enerji, fiziksel sistemlerde iş yapma veya ısı değişimi sağlama kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Çeşitli formlarda ve özelliklerde olabilen enerji kaynakları genellikle yenilenebilir ve yenilenemez olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır.

Enerji türleri, birincil ve ikincil enerji olarak da sınıflandırılabilir. Birincil enerji kaynakları, doğal kaynaklardan elde edilen ham enerjiyi ifade eder. Örneğin, kömür madenciliğiyle çıkarılan kömür veya petrol sahalarından çıkarılan ham petrol birincil enerji kaynaklarıdır. İkincil enerji ise birincil enerji kaynaklarından elde edilen, depolanmış veya dönüştürülmüş enerjidir. Elektrik, petrol rafinerilerinde işlenmiş petrol ürünleri veya biyokütle türevleri gibi ikincil enerji kaynaklarına örnek verilebilir.

Çeşitli formlarda ve kaynaklarda bulunan yenilenemez ve yenilenebilir enerji, modern enerji sistemlerinin yapı taşlarını oluştururken; bu kaynakların etkin ve sürdürülebilir kullanımı, gelecek nesiller için yaşanabilir bir dünya sağlamak adına büyük önem taşımaktadır.

Enerji, ulaştırma, endüstri gibi ekonominin her sektöründe kendine özgü kullanım modelleri ve kaynakları olması sebebiyle enerji tüketimi sektörleri arasında önemli ölçüde farklılık göstermektedir.

Enerji üretimi, iletimi ve dağıtımına ilişkin faaliyetleri kapsayan enerji sektörü kömür, petrol, doğal gaz gibi yakıtların ve elektrik üretimi için güneş ve rüzgar gibi

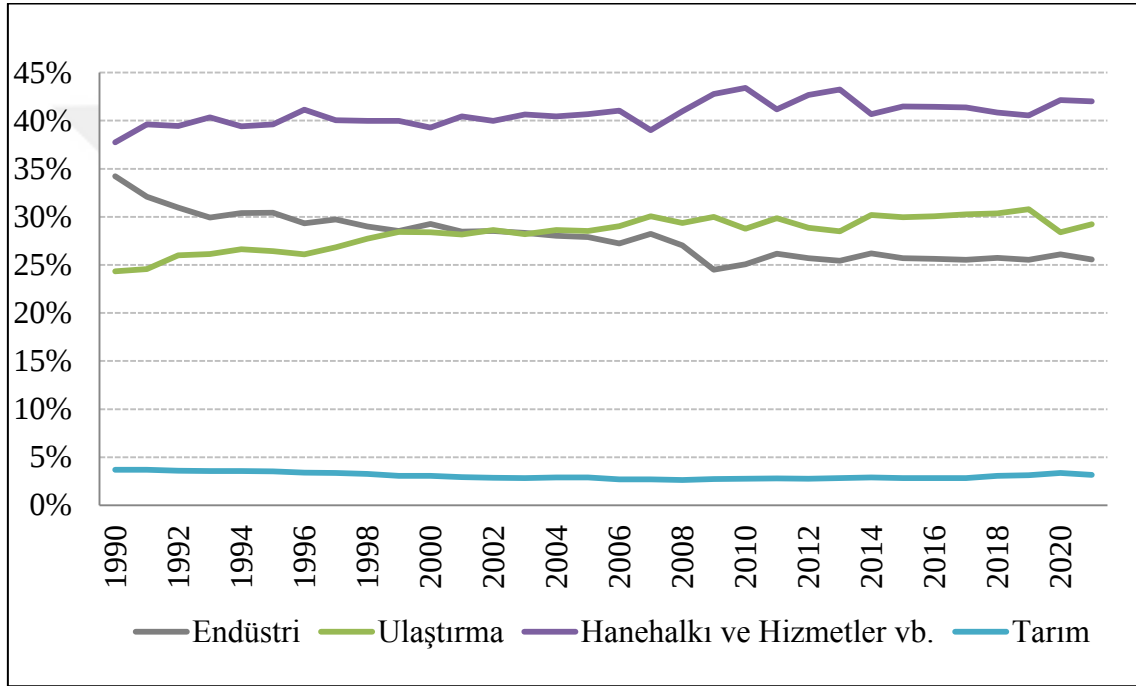
yenilenebilir kaynakların çıkarılması, rafine edilmesi ve işlenmesi için enerji tüketmektedir. Bu sektördeki enerji tüketimi öncelikle sondaj, rafinaj ve enerji üretimi dahil olmak üzere operasyonel süreçlerden kaynaklanmaktadır. Konut sektörü, enerjinin ısıtma, soğutma, aydınlatma, yemek pişirme ve ev aletlerine güç sağlamak için tüketildiği haneleri ve apartman dairelerini içermekte olup konut enerji tüketimi iklim, bina büyüklüğü ve cihazların verimliliği gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ticari sektör ofisleri, perakende mağazaları, okulları, hastaneleri ve diğer endüstriyel olmayan kuruluşları içermektedir. Bu sektördeki enerji tüketimi konut sektörlerine benzer ancak genellikle daha büyük ölçektedir.

Ulaştırma sektörü büyük bir enerji tüketicisidir ve ağırlıklı olarak benzin ve dizel gibi petrol bazlı yakıtlara dayanmaktadır. Bu sektör karayolu taşımacılığını (arabalar, kamyonlar, otobüsler), hava taşımacılığını (uçaklar), demiryolu taşımacılığını (trenler) ve deniz taşımacılığını (gemiler, tekneler) içermektedir. Ulaşımındaki enerji tüketimi öncelikle taşıt hareketliliği için gerekli olup hem yolcu hem de yük taşımacılığını içermektedir.

Endüstri sektörü, enerji tüketimi çeşitli üretim süreçlerinde ısıtma, makine ve ekipmanlara güç sağlamak için kullanılmaktadır. Endüstri sektöründe kullanılan enerji kaynakları farklılık göstermek birlikte çoğunlukla elektrik, doğal gaz, kömür ve bazı durumlarda biyokütle veya jeotermal gibi yenilenebilir kaynakları da içermektedir.

Tarım sektörü sulama, makinelerin çalıştırılması (traktörler, pompalar), ısıtma (seralar) ve tarım ürünlerinin işlenmesi için enerji tüketmektedir. Tarımdaki enerji kaynakları arasında makineler için dizel, sulama için elektrik ve bazen uzak kurulumlara güç sağlamak için güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklar yer almaktadır.

Bu sektörler toplu olarak çoğu ekonomide toplam enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Sektörler arası enerji tüketim kalıplarını anlamak, politika yapıcılar ve enerji plancıları için enerji verimliliği, tasarruf ve çevresel etkiler boyutuyla daha temiz enerji kaynaklarına geçiş için etkili stratejiler geliştirmeleri açısından büyük önem arz etmektedir. Avrupa Birliği ülkelerinde 1990-2020 yılları arası enerji tüketiminin sektörler içerisindeki payı Şekil 4'te görülmektedir. Ulaştırma sektörünün payı yıllar içerisinde artarken endüstri sektöründe azalma trendi görülmektedir.



Kaynak: (Eurostat, 2023).

Şekil 4. AB-27 Sektörlere göre Enerji Tüketimi (%). (*)

(*): Ulaştırma sektörü uluslararası havayolu ve denizyolu değerlerini içermemektedir.

2.4. Yenilenemez Enerji

Yenilenemez enerji, sürekli olarak yenilenmeyen ya da yenilenme süreci çok uzun olan ama bununla birlikte tamamen doğal yöntemlerle elde edilen bir kaynak olarak tanımlanabilmektedir.

Yaşam döngüsü içerisinde ömrünü tamamlayarak yaşamı sona eren canlılar, atmosferik koşullar altında zaman içinde toprak, çamur veya kum gibi etkenlerle kaplanarak hava ile teması kesilir. Bu şekilde muhafaza altında kalan bu canlı kalıntıları ilerleyen süreçte katılaşıp fosil haline gelir. Fiziksel hava koşullarına bağlı olarak bu kalıntılardan bazıları petrol, bazıları ise kömür veya mermere dönüşerek fosil yakıtları oluşturur (İnan vd., 2018).

Ancak fosil yakıtların söz konusu çürüme hızlarının aşırı yavaş olması sebebiyle önümüzdeki yüz milyon yıl içinde rezervlerinin değiştirilemeyecekleri öngörülmektedir. (Ghosh ve Prelas, 2009). Bu bağlamda kısa vadede yeni rezerv oluşmayacağı veya kayda değer bir keşifte bulunmayacağı öngörüsüyle fosil yakıtlardan kömürün 2080'li, doğal gazın 2060'lı, petrolün ise 2050'li yıllarda tükeneceği ile ilgili tahminler bulunmaktadır (Gore, 2012). Kömür, doğal gaz ve petrolün yanı sıra uranyum ve toryum (nükleer enerji) da yenilenemez enerji kaynakları arasında sayılmaktadır.

2021 yılında dünyada tüketilen toplam enerjinin; %6,7'lik kısmı yenilenebilir enerji kaynaklarından, %4,2'lik bölümü nükleer enerji kaynaklarından, %24,4'lük kısmı doğal gazdan, %26,9'u kömürden ve %30,9'luk kısmı ise petrolden oluştuğu gözlemlenmektedir (BP, 2022). Bu yüzdeler göz önünde bulundurulduğunda yenilenemez enerji kaynaklarının toplam enerji tüketimi içinde önemli bir payı olduğu görülmektedir (Görgülü, 2022).

2.4.1. Yenilenemez Enerji Türleri ve Özellikleri

Kömür, doğal gaz, petrol ve nükleer enerji gibi türleri içeren yenilenemez enerji kaynaklarının özellikleri aşağıda verilmektedir.

Kömür

Karbon (C), hidrojen (H) ve oksijen (O) gibi elementlerin milyonlarca yıl ısı, basınç ve mikrobiyolojik etkiler sonucunda kaya tabakalarının arasında damar halinde sedimente olmasıyla oluşan kömür organik bir kayadır (İnan vd., 2018).

Genellikle yoğun bitki örtüsüne sahip, nemli ve sıcak bölgelerde yer alan kömür rezervleri kalorisine, sertliğine ve yağ durumuna göre farklı türlerde bulunabilir. Aynı rezervde birden fazla kömür türüne de rastlanabilir. Kül ve nem miktarı fazla olan bir kömür türü olan linyit bu özelliği nedeniyle genellikle termik santrallerde tercih edilirken, yüksek kalorili bir kömür türü olan taşkömürü ise ısınma amaçlı olarak tercih edilmektedir. Toprak düzeyinde olan ve sıfır üstü yatak olarak nitelendirilen kömür rezervleri olduğu gibi havalandırma ve çıkarma maliyetleri bakımında işletilmesi çok daha zor olan ve metrelerce derinlikte bulunan (sıfır altı yataklar) kömür rezervleri de mevcuttur (İnan vd., 2018).

Kömür rezervlerinin %34,8'i Avrupa-Avrasya ülkelerinde, %32,3'ü Asya-Pasifik ülkelerinde, %27,5'i Kuzey Amerika ülkelerinde, %3,7'si Afrika-Doğu Akdeniz ülkelerinde, %1,6'i ise Güney Amerika ülkelerinde bulunmaktadır (İnan vd., 2018).

Ana tüketim alanı elektrik üretimi olan kömür, üretim aşamasında asit yağmuruna sebep veren gazları ve küresel ısınmaya önemli şekilde etkileyen CO_2 emisyonu da dahil olmak üzere çeşitli kirleticileri salması nedeniyle çevreyi tehdit etmektedir. Kömür santrallerinden kaynaklı emisyonları azaltmak için son zamanlarda verimliliği %50'ye kadar çıkarabilen süper kritik buhar üretmek ve sıfır emisyonlu kömür santralleri geliştirmek üzere çalışmalar yürütülmektedir (Ghosh & Prelas, 2009).

Gelişmiş baca gazı temizleme yöntemleri ve teknolojileri kullanmak ve elektrik santrali verimliliğini arttırmak suretiyle karbondioksit dahil olmak üzere kömür yakıtlı bir elektrik santralinden kirleticilerin emisyonunu azaltmaya yönelik çalışmalar yürütülmektedir. Temiz kömür teknolojileri, enerji santrali verimliliği iyileştirme teknolojileri ve kirlilik kontrol teknolojileri olmak üzere iki şekilde yürütülebilmektedir.

Elektrik santrallerinin verimliliğini artırmak adına aşağıda yer alan sistemler geliştirilmiştir:

- Süperkritik pulverize kömürlü yakma sistemleri
- Atmosferik dolaşimli akışkan yataklı yakma sistemleri
- Basınç dolaşimli akışkan yataklı yakma sistemleri
- Entegre gazlaştırma kombine çevrimli yakma sistemi (Görgülü, 2022).

Doğal Gaz

Petrol ile birlikte birincil enerji kaynaklarından olan doğal gaz, konut, ticari ve endüstriyel enerji sektörlerinde kullanılabilmektedir (İnan vd., 2018). Çıkarılan doğal gaz boru hatlarıyla veya sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) olarak denizaşırı ülkelere taşınmaktadır (Ambika vd., 2022; Cambaz vd., 2022). Günümüzde önemli ve baskın bir enerji kaynağı haline gelmiştir (Görgülü, 2022).

Doğal gaz rezervlerinin %43'ü Orta Doğu ülkelerinde, %30'u Avrupa ve Asya ülkelerinde, %17'si ise Afrika ve Asya Pasifik ülkelerinde bulunmaktadır (İnan vd., 2018). 2021'de global doğal gaz tüketimi %5,3 artış göstermiş ve toplamda 4.037,5 milyar metreküpe ulaşmıştır (BP, 2022).

Kömür ve petrolle kıyaslandığında daha verimli biçimde yakılabilmesi sebebiyle doğal gazın en temiz fosil enerji kaynaklarından biri olduğu kabul edilmektedir. Gübre ve elektrik üretimi gibi endüstriyel sektörler başta olmak üzere önümüzdeki yıllarda

doğal gaz tüketiminde büyük artışlar beklenmektedir. Doğal gazı tüketen en büyük iki ülke ABD ve Çin'in yanı sıra diğer kullanıcıların mevcut tüketim oranları dikkate alındığında yeni rezervler keşfedilmedikçe yaklaşık 40 yıllık bir doğal gaz rezervi bulunduğu değerlendirilmektedir (Ambika vd., 2022).

Petrol

Hidrojen ve karbonun yanı sıra az miktarda nitrojen (N), oksijen (O) ve kükürtten (S) oluşan ve karmaşık bir bileşik olan petrol, dünya enerji darboğazının oluşmasının birincil ve temel unsurudur (İnan vd., 2018).

Toprağın veya suyun tazyiki altında basınç, sıcaklık, bakteri etkileri, radyoaktif bombardıman ve katalitik tepkimelerle oluşan ham petrol, gözenekli kum taşları veya kireçtaşları tarafından emilir veya yeraltı sularının akıntısına kapılarak kum ve kireçtaşlarına sürüklenir. Böylece depo kayalar denilen petrol yataklarını oluşturur (İnan vd., 2018).

Petrolün %70'lik kısmından fazlası ulaşım sektöründe kullanılsa da günlük hayatta kullanılan çeşitli ürünler için önemli bir hammadde. Petrol, ulaşımında kullanılan yakıtların verimini en üst düzeye çıkarmak amacıyla son ürünler elde edilmeden ve halka arz edilmeden önce bir takım işleminden geçirilmektedir (Ambika vd., 2022).

Petrol tüketimi, 2021'de günde 5,3 milyon varil artmış bunun önemli bir kısmını benzin (1,8 milyon varil/gün) ve dizel/gaz yağı (1,3 milyon varil/gün) oluşturmaktadır. Bölgesel olarak, büyümenin %28'i ABD, %25'i Çin ve %11'i AB'de gerçekleşmiştir (BP, 2022).

Nükleer

Proton ve nötronlardan oluşan bir çekirdeğin kütlesi, çekirdeği bir arada tutan nükleer bağlanma enerjisinin bir ölçüsü olarak kendisini oluşturan proton ve nötronların tek tek kütlelerinin toplamından daima daha azdır. Einstein'ın ortaya koyduğu bu bağlama enerjisinin fizyon veya füzyon reaksiyonları ile kısmen serbest bırakılmasıyla elektrik üretilmektedir (Ambika vd., 2022).

Nükleer enerjinin en önemli avantajı bu reaksiyon esnasında atmosfere CO₂ emisyon salınımı yapmamasıdır. Küresel ısınma ve buna bağlı olarak çeşitli iklim değişikliklerinin temel nedenlerinden olan CO₂ salınımının olmaması, yenilenemez enerji kaynakları arasında nükleer enerjiyi daha temiz bir enerji kaynağı haline getirmektedir. Ayrıca, güneş enerjisi kullanımı için açık gökyüzünün, rüzgar enerjisi kullanımı için bol miktarda rüzgârın, bu amaçla kurulmuş santrallerin 30 yıllık ömrü boyunca sürekliliğinin sağlanmasının zorlukları bulunmaktadır. Buna karşın nükleer enerji, hava koşullarının değişimlerine maruz kalmayan sabit bir elektrik gücü kaynağı sağlamaktadır.

Nükleer enerji zararlı gaz salınımı yapmadan elektrik üretse de nükleer reaktörlerin sebep olduğu nükleer atıklara ilişkin gerekli tedbirlerin alınması önem arz etmektedir. Nükleer enerji üretiminin sürdürülebilirliği, büyük ölçüde yakıt döngüsünün kapanmasına, yani kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesine bağlıdır. Aralarında Japonya, Fransa ve Rusya'nın da bulunduğu bazı ülkeler, uzun yıllardır hafif su reaktör filolarından kullanılmış yakıtı tekrar işlemektedir. Böylelikle nükleer santrallerin ve atıklarının olumsuz etkileri asgari düzeye indirilebilmekte hatta sıfır atık sistemi sağlanabilmektedir (Ambika vd., 2022).

2.4.2. Yenilenemez Enerjide Güncel Trendler

Küresel ölçekte enerjiye olan talep her yıl bir önceki yıla kıyasla %4-%5 oranında artmaktadır. Bu talebin temelinde sanayileşme, nüfus, tüketim harcamalarının artmasının yanı sıra teknolojik alanda yaşanan gelişmeler ve buna bağlı olarak artan yüksek yaşam standartlarının karşılanması ihtiyacı yatmaktadır (Kaya vd., 2018). Maliyet ve ulaşılabilirliğinin kolaylığı nedeniyle artan bu talep petrol, doğalgaz ve kömür gibi yenilenemez enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Ancak yüksek hidrokarbon içeren bu tür fosil yakıtlar, çevreye karbondioksit ve benzeri sera gazlarının salınımını hızlandırarak çevre kirliliğine ve küresel ısınmanın hızlanmasına yol açmaktadır. Bunun doğal bir sonucu olarak biyolojik çeşitlilikte azalma, tarımsal üretimde gerileme, iklimde olumsuz değişiklikler ve ormansızlaşmanın artması neticesinde toprak erozyonlarının artması ile karşı karşıya kalınmaktadır (Özbektaş vd., 2023).

Fosil yakıtlar içinde kömür, elektrik üretiminde 2021 yılında en yüksek değerlerine ulaşarak 10244 TWh ile birincil enerji kaynağı olmaya devam etmektedir. Elektrik üretiminde ikinci büyük paya sahip olan doğal gazın kullanım oranı da artış göstermektedir. Diğer iki yenilenemez enerji kaynağı olan nükleer ve petrolün elektrik üretimindeki payı 2000’li yıllar boyunca daha stabil kalmıştır (Özbektaş vd., 2023).

Yenilenemez enerji kaynaklarının yukarıda belirtilen nedenlerle kullanımının ağırlığını devam ettirilmesi nedeniyle bu enerjinin daha verimli kullanılması, enerji tüketimindeki artışla birlikte önemli bir trend haline gelmektedir. Endüstriyel tesislerden konutlara kadar geniş bir yelpazedeki sektörlerde enerji verimliliği çözümleri aranmaktadır.

Bu noktada, kullanılan yöntemlerden biri Karbon yakalama ve depolamadır (CCS). CCS, fosil yakıtların yanması sırasında ortaya çıkan karbon dioksitin yakalanması ve depolanması işlemidir ve bu teknoloji, sera gazı emisyonlarını azaltma ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynayabilir.

Doğal gaz, temiz bir fosil yakıt olarak kabul edilir ve enerji geçiş sürecinde önemli rol oynamaktadır. Yenilenemez enerji kaynakları arasında doğal gazın kullanımı giderek artmaktadır. Ancak, bu artışın sürdürülebilirliği ve doğal gazın uzun vadeli rolü hakkında tartışmalar devam etmektedir.

Bazı ülkeler nükleer enerjiyi iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir araç olarak görürken diğerleri nükleer enerjiyi güvenlik ve çevresel endişeler nedeniyle tercih etmediğinden nükleer enerjinin geleceği hakkındaki tartışmalar sürmektedir.

Bu nedenlerle birçok ülke, enerji üretimindeki karbon yoğunluğunu azaltmak için fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yapmaktadır. Bu geçiş süreci, politikalar, teknolojik gelişmeler ve ekonomik faktörler tarafından şekillenmektedir.

2.4.3. Türkiye’de Yenilenemez Enerji Kaynaklarına İlişkin Değerlendirme

Dünyadaki trende benzer şekilde Türkiye’de de yenilenemez enerji türleri arasında elektrik enerjisi üretiminde en çok kömürün kullanıldığı görülmektedir (Özbektaş vd., 2023). Genel enerji kullanımına bakıldığında petrolün %29 ile en yüksek kullanım oranına sahip olduğu, kömür ve doğalgazın %27’lik paylarla bu yakıt türünü izlediği görülmektedir (Arı ve Yılmaz, 2023).

Fosil yakıtların Türkiye’deki genel enerji kullanımı, %83’lere ulaşan bir paya sahiptir. Dolayısıyla Türkiye’nin fosil yakıtlara bağımlı bir ülke olduğu ifade edilebilir.

Diğer yandan bu yakıtların üretimin miktarı mevcut talepleri karşılayamadığından yeterli ölçüde rezerve sahip olmayan Türkiye'nin, enerji ihtiyacını ithalat yoluyla karşılayabilmektedir. Bu durum Türkiye'yi enerji açısından dışa bağımlı kıldığı gibi başta ekonomi olmak üzere birçok alanda olumsuz sonuçları beraberinde getirmektedir (Arı ve Yılmaz, 2023).

Kömür dünya genelinde diğer enerji kaynaklarına oranla rezervi fazla olup üretimi ve ticareti birçok ülke tarafından yapılmaktadır. Türkiye petrolde dışa bağımlı bir ülke olduğu gibi kömür içinde aynı durum söz konusudur (Kapçak, 2022).

2015 yılında Türkiye'de kömür üretimi 16,5 milyon ton iken kömür tüketimi 36,1 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Tüketim ve üretim arasındaki fark yaklaşık olarak 20 milyon tondur. 2019 yılında kömür üretimi 17 milyon ton iken, 2019 yılında tüketimi ise 42,3 milyon ton olarak kayıtlara geçmiştir. 2019 yılında tüketim ile üretim arasındaki fark 25,3 milyon ton olarak görülmektedir. Her geçen yıl tüketim ile üretim arasındaki fark sürekli bir artış göstermektedir. Türkiye petrol tüketiminde dışa bağımlı olduğu gibi rezerv ve üretimi bakımından kömür fazla olsa bile iç talebi karşılayamadığından önemli ölçüde ithal etmektedir (Kapçak, 2022).

Türkiye'de fosil yakıtlardan petrol, kömür ve doğalgazın kullanım oranları birbirine yakın seyretse de bu enerji kaynaklarından diğerlerine oranla daha temiz sayılabilecek, insan sağlığı ve çevresel etkiler açısından görece daha az zararı bulunan doğal gazın kullanım oranının en düşük düzeyde kalması yönetilmesi gereken bir risk olarak değerlendirilebilir (Arı ve Yılmaz, 2023).

Günümüzde sektörlerin hemen hemen hepsinde kullanılan doğal gazın önemli ölçüde konut sektöründe ısınma amaçlı kullanıldığı ifade edilmektedir. Doğal gaz kolay

yanabilen ve yanarken yüksek oranda verimlilik elde edilebilen bir enerji kaynağıdır (Kapçak, 2022).

Türkiye’de doğal gaz rezervleri oldukça azdır. 2015 yılında üretilen doğal gaz miktarı 398,7 milyon metreküp iken, 2019 yılında bu oran artış göstererek 483,1 milyon metreküp olmuştur. Son iki yılda doğal gaz üretimi artış eğilimindedir. Ancak bu üretim miktarları Türkiye ekonomisi için yeterli olmamaktadır (Kapçak, 2022).

Türkiye açısından üretimi az olan doğal gaz enerji kaynağı üretim düzeyi yeterli olmadığından iç talebi karşılamak için ciddi ve önemli düzeyde ithal edilmektedir. Türkiye fosil yakıtlar olan petrol ve kömür gibi enerji kaynaklarında dışa bağımlı iken aynı zamanda doğal gaz içinde önemli ölçüde dışa bağımlı bir ülke konumundadır (Kapçak, 2022).

Petrol hem siyasi hem de ekonomik anlamda dünya gündeminde ciddi bir güç oluşturmaktadır. Tüm dünyada olduğu gibi, Türkiye’de de mevcut teknolojiyle petrol kaynaklarını ekonomiye kazandırmak için aynı zamanda hem ekonomi üzerindeki yükü hem de dışa bağımlılığı azaltabilmek için petrol arama çalışmalarına devam edilmektedir (Kapçak, 2022).

Petrol üretimi Türkiye ekonomisinde iç talebi karşılamamaktadır. Bu yüzden önemli bir tüketim maddesi olan petrol, Türkiye üzerinde önemli bir maliyet ve ekonomik yük oluşturmaktadır. 2015 yılında 2,51 milyon ton üretilen petrolün 2019 yılında üretim miktarı 2,98 milyon tona çıkmıştır. 2015-2019 dönemi itibariyle bakıldığında petrol üretiminde bir miktar artışın olduğu görülmektedir (Kapçak, 2022).

Türkiye, petrol tüketiminde dünya ülkeleri arasında son derece önemli bir konumdadır. Her yıl petrol tüketimi önemli ölçüde artış göstermektedir. Petrol ihraç

eden ülkeler için dış ticaret açığı konusunda olumlu sonuç verirken Türkiye gibi enerjide dışa bağımlı ülkeler için ise dış ticaret açığı artış göstermektedir (Kapçak, 2022).

2.5. Yenilenebilir Enerji Kavramı

Yenilenebilir enerji, doğada sınırsız veya sonsuz olarak yenilenebilen enerji kaynaklarından elde edilen enerjiyi ifade etmektedir. Bu kaynaklar, fosil yakıtlar gibi tükenmez ve doğal süreçlerle devamlı olarak yenilenir. Yenilenebilir enerji kaynakları, çevreye daha az zarar verir ve iklim değişikliği ile mücadele noktasında sera gazı emisyonlarını azaltılmasına verdiği destekle önemli katkıya sahiptir. Ayrıca, yenilenebilir enerjinin kullanımı, sürdürülebilir kalkınma ve enerji güvenliği açısından sağladığı katkılar nedeniyle giderek artmakta ve enerji üretiminde daha fazla pay sahibi olmaktadır. Daha yeşil ve temiz bir dünya için gerekli olan yenilenebilir enerji kaynaklarının ülkemizde ve dünyadaki potansiyelinin belirlenmesi çok daha önemli hale gelmiştir.

2.5.1. Yenilenebilir Enerji Türleri ve Özellikleri

Yenilenebilir enerji, çeşitli doğal kaynaklardan elde edilebilir ve bu kaynaklara göre farklı türlerde olabilir.

Füzyon reaksiyonları ile hidrojenin helyuma dönüşmesi sırasında oluşan kütle farkının ısı enerjisine dönüşmesiyle uzaya yayılan Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Yayılan bu enerjinin bir kısmı yeryüzüne ulaşır ve Fotovoltaik (PV) hücreler veya termal güneş kolektörleri gibi teknolojiler kullanılarak çeşitli formlarda enerji kaynağı olarak kullanılabilir (Duffie ve Beckman, 2013).

Güneş enerjisi, özellikle yüksek güneş ışığına maruz kalan bölgelerde etkilidir ve elektrik şebekesine bağlı veya bağımsız sistemlerde kullanılabilir.

Bir diğ er yenilenebilir enerji kaynağı olan r zg ar enerjisi, tarihsel açıdan en eski enerji kaynağıdır. Eski yıllarda su pompalama ve buğday öğütme işlemleri için kurulan r zg ar değıirmenlerinden yararlanılmıştır. Modern anlamda bu kaynağın elektrik enerjisine d n   t r lerek kullanılması ise 1980’li yıllara uzanmaktadır. R zg ar değıirmenleri yerini günümüzde r zg ar trib nlerine bırakarak, elektrik enerjisi üretmek için önemli bir doğıal kaynağıa d n   m   t r ( ymen ve  meroğılu, 2020). R zg ar enerjisi r zg ar türbinleri aracılığıyla kinetik enerjinin elektrik enerjisine d n   t r lmesiyle üretilir. R zg ar enerjisi potansiyeli, r zg ar hızı ve türbin teknolojisi gibi faktörlere bağılı olarak değı ir. R zg ar enerjisi genellikle r zg ar çiftlikleri veya r zg ar tarlaları adı verilen alanlarda toplu olarak kurulur.

Biyoen rji, organik malzemelerin (bitkiler, hayvan atıkları, odun vb.) yanması, fermentasyonu veya kimyasal d n    mleriyle elde edilen ve genel olarak biokütle olarak adlandırılan kaynakların doğırudan kullanımı veya sıvı/gaz haline getirilmesi işlemleri neticesinde ortaya çıkmaktadır. Bu enerjinin temelinde organizmaların vücutlarında depolanmış güneş enerjisi yatmaktadır. Bitkilerin yaptığı fotosentez sonucu ortaya çıkan kimyasal enerji, sonrasında beslenme yolu ile hayvanlara geçmektedir (IEA, 2017).

Hidroelektrik enerji, su akışıyla hidroelektrik barajlar veya akarsular aracılığıyla kinetik enerjinin elektrik enerjisine d n   t r lmesiyle sağılanır (Gulliver ve Goodman, 2014). Büyük  l ekli hidroelektrik santralleri, suyun potansiyel enerjisini depolamak ve kontrol etmek için barajları kullanır. Hidroelektrik enerji, su kaynaklarının bol olduğı bölgelerde özellikle etkilidir.

Jeotermal enerji, yerin derinliklerindeki sıcak kayalar veya sıcak su yatakları aracılığıyla elde edilir. Jeotermal enerji, jeotermal kuyular ve jeotermal enerji santralleri

vasıtasıyla elektrik üretimi veya ısıtma amaçlı kullanılabilir. Jeotermal kaynaklar, tektonik hareketlerin yoğun olduğu bölgelerde ve volkanik aktivitenin olduğu alanlarda bulunur (DiPippo, 2016).

Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına oranla daha yeni bir tür olan deniz kökenli enerji kaynakları (okyanus enerjisi) henüz geliştirilme aşamasındadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), günümüzde en yaygın olan “dalga enerjisi” ve “gel-git enerjisi” dışında “deniz akımları enerjisi”, “sıcaklık değişimi” ve “tuz değişimi” teknolojileri olmak üzere toplamda beş farklı deniz kökenli enerji teknolojisi üzerinde çalışmaların devam ettiğini belirtmektedir (IEA, 2017).

2.5.2. Gelişmiş Ülkelerde Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Gelişmiş ülkeler, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak ve karbon emisyonlarını azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarını çeşitli şekillerde teşvik etmekte ve kullanmaktadır. Bu kaynaklar, enerji güvenliği sağlamanın yanı sıra çevresel etkileri azaltarak iklim değişikliği ile mücadelede de önemli bir rol oynamaktadır.

AB, yenilenebilir enerji kapasitelerinin kurulumunu hızlandırmış ve artan miktarlarda yenilenebilir elektrik üretmiştir. 2022'de elektriğin %39'u yenilenebilir kaynaklardan üretilmiş olup Mayıs 2023'te rüzgâr ve güneş ilk kez toplam fosil elektrik üretimini geçmiştir. 2022, 2021'e (26 GW) kıyasla %60 daha fazla olan yeni güneş fotovoltaik (PV) kapasitesi (41 GW) için rekor bir yıl olmuştur. Benzer sonuçlar, hızlandırılmış izin süreçleri sayesinde kara ve açık deniz rüzgâr kapasitesinde de elde edilmiştir (2021'e göre %45 daha fazla kapasite kurulmuştur, Avrupa Komisyonu, 2023).

AB, REPowerEU ve Avrupa Yeşil Anlaşması doğrultusunda temiz enerjiye geçiş için daha yüksek hedefler üzerinde anlaşmaya varmıştır. Eş-yasa koyucular, 2030

yılına kadar AB enerji karışımında %42,5 yenilenebilir enerji hedefini %45'e çıkarma ve 2030 yılına kadar AB düzeyinde nihai enerji tüketimini, oluşturulan 2020 yılı projeksiyon senaryoları ile kıyaslandığında %11,7 azaltma hedefi üzerinde anlaşmaya varmıştır. Ocak 2023'te ise Üye Devletler, AB'nin beş deniz havzasının her birinde 2030 ve 2040 için ara hedeflerle birlikte 2050 yılına kadar açık deniz yenilenebilir enerji üretimine yönelik bağlayıcı olmayan hedefler üzerinde anlaşmaya varmıştır. Yeni 2030 hedefleri, Komisyon'un 2020 stratejisinde belirlenen 61 GW'lık hedefin neredeyse iki katı kadardır. Bu durum, bu on yılın sonuna kadar yaklaşık 111 GW'lık açık deniz yenilenebilir enerji üretim kapasitesinin kurulmasına yönelik genel bir hedef vermekte ve AB'nin açık deniz yenilenebilir enerji stratejisine uygun olarak yüzyılın ortasına kadar yaklaşık 317 GW'a yükselmektedir.

REPowerEU'yu temel alan AB, suni yapılar üzerindeki güneş fotovoltaik (PV) ve ısı pompalarının yanı sıra yeniden güçlendirme gibi hızlı dağıtım için en yüksek potansiyele sahip belirli teknolojilere ve projelere odaklanarak yenilenebilir izin prosedürlerini basitleştiren ve hızlandıran İzin Yönetmeliğini kabul etmiştir. 2022 yılında, esas olarak güneş enerjisi ve rüzgâr türbinleri olmak üzere 57 GW sıfırdan yenilenebilir enerji kapasitesi kurulmuştur. Her iki sektörde de bu rakam 2021 yılına göre yaklaşık %50 daha fazladır. Bu durum, artan yağışlar ve yüksek rezervuar seviyeleri nedeniyle 2023'te ortalama seviyelere doğru toparlansa da 2022'deki düşük hidroelektrik üretiminin (toplam elektrik üretiminin %12'si) dengelenmesine fazlasıyla yardımcı olmuştur. Yenilenebilir ısıtma sektöründe, ısı pompalarının kullanımı 2021 yılına kıyasla %39 oranında artmıştır (Avrupa Komisyonu, 2023).

AB üye ülkelerinde termal güneş enerjisi pazarı neredeyse %12 oranında artmıştır. Katı biyoyakıtlardan elektrik üretimi istikrarlı bir seyir izlemiş ve toplam elektrik üretiminin yaklaşık %3'ünü oluşturmuştur (2020'de %2,9 ve 2021'de %3,1).

Elektrik ve ısı üretimi için enerji birleştirildiğinde, AB'deki ana yenilenebilir enerji kaynağı biyoenerji olmaya devam etmektedir (yaklaşık %60). Toplamda, yenilenebilir enerjilerin enerji kompozisyonundaki payı 2022 ve 2023 yılları boyunca önemli ölçüde artmış olmakla beraber AB, 2030 yılına kadar AB enerji kompozisyonunda %42,5'lik bir hedef ve %45'e ulaşma arzusu ile yenilenebilir enerjilerin dağıtımını hızlandırmayı kabul etmiştir (Avrupa Komisyonu, 2023).

2.5.3. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım kapasitesi ve çeşitliliği açısından bakıldığında Türkiye zengin bir ülkedir. Dünya jeotermal enerji potansiyelinin %8’inin ülkemizde olduğu, coğrafi konumu açısından yüksek güneş enerjisini kullanabilme potansiyeli bulunduğu, ayrıca yer şekillerinin özellikleri bakımından hidrolik ve rüzgâr enerjisini kullanabilme imkanı olduğu hususları birlikte değerlendirildiğinde bu zenginlik daha net anlaşılabilecektir (Yılmaz, 2012).

2013 yılı verilerine göre dünyadaki 1000 GW’lık kurulu hidrolik enerji gücünden toplam 3782 TWh’lik elektrik enerjisi sağlanmış, dünyada hidrolik enerjiden en çok yararlanan ülke Çin olmuştur (Koç ve Kaya, 2015).

EÜAŞ verilerine bakıldığında, Türkiye’nin hidroelektrik enerji kurulu gücü 23.640,9 GW seviyesine ulaşmış, bu kapasitenin yaklaşık %30’u 443 hidro-elektrik akarsu santrali, kalan %70’lik kısmı ise 77 barajlı hidro-elektrik santralinden oluşmaktadır (DSİ, 2014). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü verilerine göre Türkiye, dünyada hidroelektrik enerji potansiyelinin %1,5’ine, Avrupa ekonomik potansiyelinin %17,6’sına sahiptir. Bu alanda Norveç’ten sonra Avrupa’nın en yüksek potansiyeline sahip ülkesidir (Gökdemir vd., 2012).

Jeotermal enerji kaynakları açısından bir değerlendirme yapıldığında Türkiye’de bulunan yaklaşık 1.000 kadar doğal sıcak su kaynağı önemli bir potansiyel yaratmaktadır. Elektrik üretimi ve ısıtma amacıyla kullanılabilen Türkiye’nin jeotermal kapasitesinin yarısından fazlası 2014 yılı itibariyle kullanabilir düzeye ulaşmış, yakın gelecekte jeotermal elektrik enerjisi kapasitesinin tamamından yararlanılması hedeflenmektedir (Koç ve Kaya, 2015).

Coğrafi konumu itibariyle İspanya’dan sonra Avrupa’daki en iyi güneş enerjisi potansiyeline sahip olan Türkiye, 1 m²’lik bölgeden yıllık ortalama 1.000–1.450 kWh güneş enerjisi elde etme imkanına sahiptir. Elektrik İşleri İdaresi (EİE) tarafından hazırlanan Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlasına (GEPA) göre, Türkiye’de 56.000 MW termik santral kapasitesine eşdeğer güneş enerji kapasitesinin bulunduğu ve bu potansiyelden yararlanılması durumunda yıllık ortalama 380.000 GWh’lık elektrik enerjisi üretilebileceği belirlenmiştir (Koç ve Kaya, 2015).

Bir diğer yenilenebilir enerji kaynağı olan biyokütle açısından da yıllık yaklaşık 117 milyar ton biyokütle potansiyeli ile ülkemiz önemli fırsatlar barındırmaktadır. Biyokütle kaynaklarından yıllık 371,2 TWh elektrik enerjisi üretim potansiyeli bulunan Türkiye’nin, bu potansiyelinin yaklaşık %45’i tek yıllık bitkilere, %17’si orman atıklarına ve çok yıllık bitkilere aittir. Ayrıca ülkemizin %7 oranında hayvansal atık potansiyeline karşılık gelen biyogaz kapasitesinin bulunduğu değerlendirilmektedir (Koç ve Kaya, 2015).

Türkiye, coğrafi konumu ve doğal kaynakları sayesinde oldukça zengin bir yenilenebilir enerji potansiyeline sahiptir. Bu potansiyel, güneş enerjisi ve jeotermal enerji gibi birçok alanda kendini göstermektedir.

Ülkemizin güneş ışınlam süresi ve yoğunluğu bakımından Avrupa'nın en avantajlı ülkelerinden biri olup yıllık ortalama güneşlenme süresi yaklaşık 2.700 saat (7,5 saat/gün), yıllık ortalama güneş enerjisi yoğunluğu ise 1.527 kWh/m² seviyesindedir. 2024 yılı itibarıyla kurulu güneş enerjisi kapasitesi 10 GW'ın üzerine çıkmış olup Güneydoğu Anadolu, Akdeniz ve İç Anadolu bölgeleri en yüksek güneş potansiyeline sahiptir (ETKB, 2024).

Avrupa'nın rüzgâr enerjisi açısından en avantajlı ülkelerinden biri olan ülkemiz rüzgâr potansiyeli atlasına göre, 48 GW seviyesinde ekonomik rüzgar enerjisi potansiyeli bulunmaktadır. 2024 itibarıyla Türkiye'nin rüzgâr enerjisi kurulu kapasitesi 12 GW'ı aşmıştır (ETKB, 2024). Ülkemizin coğrafi bölgelerinden Akdeniz, Ege ve Marmara bu enerji türüne yönelik yatırımlar açısından idealdir.

Türkiye'nin 2024 yılı itibarıyla kurulu hidroelektrik kapasitesinin yaklaşık 32 GW seviyesinde olduğu görülmekte olup hidroelektrik potansiyelinin yaklaşık %60'ını kullanmaktadır.

Türkiye; jeotermal kaynak zenginliği bakımından küresel ölçekte ilk 7 ülkeden biri olup potansiyeli 31.500 MWh olarak tahmin edilmektedir. Kurulu jeotermal elektrik üretim kapasitesi 2 GW seviyesindedir. Bu kapasite Ege Bölgesi'nde, özellikle Aydın, Denizli ve Manisa'da yoğunlaşmaktadır.

Tarımsal, hayvansal ve kentsel atıklardan enerji üretme kapasitesi yüksek olduğundan Türkiye'nin toplam biyokütle enerji potansiyelinin 8,6 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) düzeyinde olduğu değerlendirilmektedir (ETKB, 2024). 2024 yılı itibarıyla kurulu biyokütle enerjisi kapasitesi 2 GW'a yaklaşmıştır.

2035 yılına kadar yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payının %55 seviyesine ulaştırılması hedeflenmekte olup Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığını ortadan kaldırmak için 2035 yılına kadar her yıl 3 bin 500 MW'ı güneş, bin 500 MW'ı rüzgâr olmak üzere 5 bin MW'lık kurulu güç artışı ile 2024 dahil önümüzdeki 12 yıl boyunca da toplam 60 bin MW yeni kurulu güce ulaşılması için çalışılmaktadır (ETKB, 2024).

Yolcu ve yük taşımacılığında karayolu payının %90 seviyesinde olduğu ülkemizde sera gazı emisyonlarının azaltılması, iklim değişikliği etkilerinin minimum seviyelere düşürülmesi, enerji verimliliğinin artırılarak üretim ve tüketim maliyetlerinin makul seviyelere çekilmesinde yenilenebilir enerjinin toplam enerji üretim hacmi içindeki oranının artırılması önemli olarak değerlendirilmektedir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ENERJİ KAYNAKLARIYLA ETKİLEŞİMİ

İklim değışikliğı; küresel ölçekte iklim koşullarında belirgin ve sürekli bir değışikliğı ifade ederken enerji kaynakları, insanların ihtiyaçları için gereksinim duydukları ve kullandıkları doğrudan ve dolaylı tüm kaynakları tanımlamaktadır. İklim değışikliğı ve enerji kaynakları arasındaki etkileşimi şu şekilde özetleyebiliriz:

- Yenilenebilir enerji ve iklim değışikliğı: Rüzgar, güneş, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları, düşük veya sıfır karbon emisyonları olarak değerlendirilirken fosil yakıtlara göre sera gazı emisyonlarını dikkate değer seviyelerde düşürebilmekte ve iklim değışikliğı ile mücadelede önemli katkılar sunmaktadır.
- Nükleer enerji ve iklim değışikliğı: Nükleer enerji tesislerinin yapımı, işletilmesi ve nükleer atıkların yönetimi, çevre ve güvenlik riskleri oluşturmakla birlikte düşük sera gazı emisyonlarına sahip bir enerji kaynağıdır.
- Enerji politikaları ve iklim değışikliğı: Karbon salınımına yönelik vergiler, sera gazı emisyonlarının sınırlandırılması ve yenilenebilir enerji kullanımını teşvik edici politikalar, iklim dostu bir enerji sektörü oluşturmak için önemli adımlardır.

3.1. İklim Değışikliğinin Enerji Kaynakları Üzerine Etkisi

Yenilenebilir enerji kaynakları kapsamında güneş enerjisi; güneş ışığının fotovoltaiik paneller veya termal kolektörler aracılığıyla elektrik veya ısı enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilmektedir. Güneş enerjisi sistemlerinin işletme süreci genel olarak karbon emisyonunun olmadığı bir temiz enerji üretimi olarak görülmektedir.

Rüzgar enerjisi; rüzgar türbinleri kullanılarak rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmekte olup işletme süreci, karbon emisyonu olmadan ve sürdürülebilir bir şekilde elektrik üretmek için tercih edilmektedir.

Hidroelektrik enerji; su akışının türbinler kullanılarak mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilmektedir. İklim değişikliği, su kaynaklarının azalması veya artan su düzensizlikleri nedeniyle hidroelektrik enerji tesisleri olumsuz etkilenmekte, enerji üretiminde istikrarsızlıklar oluşmaktadır.

İklim değişikliği; rüzgar yönü ve hızlarında önemli değişikliklere neden olabilmekte, bu durum rüzgar enerjisi tesislerinin planlama ile öngörülen ve elde edilen verimlilik süreçlerini karmaşık hale getirmektedir.

İklim değişikliğine bağlı olarak buzulların erimesi deniz seviyesinin yükselmesine ve kıyılarda konumlanmış enerji tesislerinin zarar görmesine neden olmaktadır. İklim değişikliği sebebiyle aşırı hava olaylarının sıklığı ve şiddeti artmakta fırtınalar, kasırgalar, seller ve şiddetli yağışlar, enerji iletim hatlarına ve altyapısına zarar vermektedir. Oluşan aşırı hava olayları, su kaynaklarının azalması ve diğer faktörler nedeniyle enerji üretimi ve dağıtımında kesintilere neden olurken enerji güvenliği ve sürdürülebilirliği tehlikeye düşürmektedir.

3.1.1. İklim Değişikliğinin Yenilenemez Enerji Kaynakları Üzerine Etkisi

İklim değişikliği, artan sıcaklık ve iklimdeki düzensizlikler nedeniyle fosil yakıt üretiminde ve kullanımında önemli etkilere sahip olabilir. Özellikle petrol rafinerileri ve doğal gaz işleme tesisleri gibi altyapılar, aşırı sıcaklık ve sıcaklık dalgalanmaları nedeniyle risk altında olabilir.

Kömür madenciliği ve petrol üretimi gibi fosil yakıt faaliyetleri, genellikle büyük miktarda su kullanır. İklim değişikliği, su kaynaklarının azalması veya kuraklık nedeniyle bu tür faaliyetlerin sürdürülebilirliğini etkileyebilir.

Fosil yakıtlardan oluşan hava kirliliği, çeşitli sağlık sorunlarının artmasına neden olabilir.

Nükleer santraller, soğutma için büyük miktarda su kullanır. İklim değişikliği, su kaynaklarının azalması veya sıcaklık artışı nedeniyle su kısıtlamalarına ve soğutma sorunlarına yol açabilir.

İklim değişikliği, nükleer santrallerin dayanıklılığını ve güvenliğini etkileyebilir. Özellikle şiddetli fırtınalar, sel ve aşırı hava olayları, nükleer tesislere zarar verebilir ve radyoaktif sızıntı riskini artırabilir.

Nükleer tesislerin radyoaktif atıklarının yönetimi de iklim değişikliğinden etkilenebilir. Özellikle deniz seviyesi yükselmesi veya aşırı yağışlar nedeniyle radyoaktif atıkların depolanması ve bertarafı güçleşebilir.

Kömür ve petrol madenciliği, genellikle yeraltı su kaynaklarının kullanımını gerektirir. İklim değişikliği, su kaynaklarının azalması veya kuraklık nedeniyle bu tür faaliyetlerin sürdürülebilirliğini etkileyebilir.

İklim değişikliği, kömür ve petrol madencilik tesislerinin ve altyapısının dayanıklılığını etkileyebilir. Özellikle sel, erozyon ve toprak kaymaları gibi aşırı hava olayları, maden ocaklarına zarar verebilir ve iş güvenliğini tehlikeye atabilir.

Doğal gaz üretim tesislerinin ve boru hatlarının dayanıklılığı iklim değişikliğinden etkilenebilir. Özellikle erozyon, toprak kayması ve sel gibi aşırı hava olayları, doğal gaz altyapısına zarar verebilir ve enerji tedarikini kesintiye uğratabilir.

İklim değişikliği, artan sıcaklık ve iklim değişikliklerinin doğal gaz talebi üzerinde etkisi olabilir. Özellikle yaz aylarında artan sıcaklık, elektrikli soğutma sistemlerinin ve doğal gazla çalışan ısıtma sistemlerinin talebini artırabilir.

Fosil yakıtların kullanılmasıyla atmosfere bırakılan karbondioksit ve metan gibi gazlar, atmosferde birikerek sera etkisi oluşturmakta, güneş ışınlarının atmosferde tutulmasına, dünya yüzeyinin ısınmasına neden olmakta ve sonuç olarak küresel ısınma ve iklim koşullarındaki değişimler meydana gelmektedir.

3.1.2. İklim Değişikliğinin Yenilenebilir Enerji Kaynakları Üzerine Etkisi

İklim değişikliğinin yenilenebilir enerji kaynakları ile ilişkisi aşağıda alt başlıklar halinde verilmiştir.

Artan Güneş Radyasyonu: İklim değişikliği, güneş ışınlarının dünya yüzeyine daha fazla ulaşmasına neden olabilir. Bu durum, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırabilir ve güneş paneli teknolojilerinin daha etkili hale gelmesine katkıda bulunabilir.

Artan Sıcaklık ve Soğutma İhtiyacı: Yüksek sıcaklık, artan anormal hava koşulları ve sera etkisi, insanların daha fazla soğutma ihtiyacı duymasına neden olabilir. Bu durum, güneş enerjisiyle çalışan soğutma sistemlerine olan talebi artırabilir.

İklim Değişikliğinin Uzun Dönemli Etkileri: İklim değişikliği, uzun dönemde güneş enerjisi sistemlerinin yerleşim yerleri ve tasarımına olan ihtiyacı etkileyebilir.

Örneğin, artan sıcaklık ve kuraklık, güneş enerjisi sistemlerinin bakımını ve performansını etkileyebilir.

Değişen Rüzgar Desenleri: İklim değişikliği, rüzgar desenlerinde ve hızlarında değişikliklere neden olabilir. Bu durum, rüzgar enerjisi tesislerinin performansını etkileyebilir ve daha karmaşık tahmin ve yönetim sistemlerinin gerekliliğini ortaya çıkarabilir.

Aşırı Hava Olayları: İklim değişikliği nedeniyle aşırı hava olaylarının meydana gelme olasılığı ve büyüklüğü artış gösterebilmektedir. Bu durum, rüzgar türbinlerinin dayanıklılığını ve mühendislik standartlarını etkileyebilir. Ayrıca, güvenlik önlemlerinin ve acil durum planlarının güncellenmesini gerektirebilir.

Deniz Seviyesi Yükselmesi: Rüzgar enerjisi tesislerinin birçoğu kıyı bölgelerinde yer alır. İklim değişikliğine bağlı olarak deniz seviyesinin yükselmesi, kıyı tesislerini ve altyapısını tehdit edebilir ve bakım maliyetlerini artırabilir.

Su Kaynaklarının Azalması: İklim değişikliği, su kaynaklarının azalması veya düzensizleşmesine neden olabilir. Bu durum, hidroelektrik tesislerinin performansını ve verimliliğini etkileyebilir. Ayrıca, su kaynaklarının yönetimi ve sürdürülebilir kullanımı üzerinde daha fazla baskı yaratabilir.

Artan Kuraklık ve Seller: İklim değişikliği, kuraklık ve sellerin sıklığını ve şiddetini artırabilir. Bu durum, hidroelektrik tesislerinin su kaynaklarının yönetimini ve operasyonlarını etkileyebilir. Ayrıca, su baskınlarının hidroelektrik tesislerine zarar verme riskini artırabilir.

Toprak Sıcaklık Değişimi: İklim değişikliği, yeraltı su kaynaklarının sıcaklığını ve akışını, jeotermal enerji kaynaklarının performansını ve verimliliğini, jeotermal rezervuarların yönetimini ve sürdürülebilirliğini etkileyebilir.

Yeraltı Su Kaynaklarının Azalması: İklim değişikliği, yeraltı su kaynaklarının azalmasına neden olabilir. Bu durum, jeotermal enerji tesislerinin su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını etkileyebilir. Ayrıca, yeraltı su seviyelerinin düşmesi, jeotermal rezervuarların performansını olumsuz hale getirebilir.

3.2. Enerji Kaynaklarının İklim Değişikliği Üzerindeki Etkisi

3.2.1. Yenilenemez Enerji Kaynaklarının İklim Değişikliği Üzerindeki Etkisi

Fosil yakıtlar ulaşım ve endüstriyel süreçlerde yaygın olarak kullanılmakta ve atmosfere CO₂, SO₂, NO_x ve CO gibi kirleticilerin salınmasına neden olmaktadır. Bu kirleticiler, hava kirliliğine, asit yağmurlarına, biyoçeşitlilik kaybına ve sağlık sorunlarına neden olmakta ve sera gazı emisyonlarını artırarak küresel ısınmayı hızlandırmaktadır.

Nükleer enerji, karbon emisyonları olmayan temiz bir enerji kaynağıdır. Ancak, nükleer tesislerin işletilmesi ve nükleer atıkların yönetimi çevresel riskler oluşturur. Nükleer kazalar, radyoaktif kirliliğe ve sağlık sorunlarına yol açar. Ayrıca, nükleer enerji tesislerinin olası hedefler olması ülkeler için güvenlik endişelerine de sebep olmaktadır.

Enerji tüketimi nedeniyle oluşan karbon dioksit, metan ve nitroz oksit dahil olmak üzere sera gazı (GHG) emisyonları, benzersiz enerji tüketimi kaynakları ve faaliyetleri nedeniyle ekonominin farklı sektörleri arasında farklılık göstermektedir.

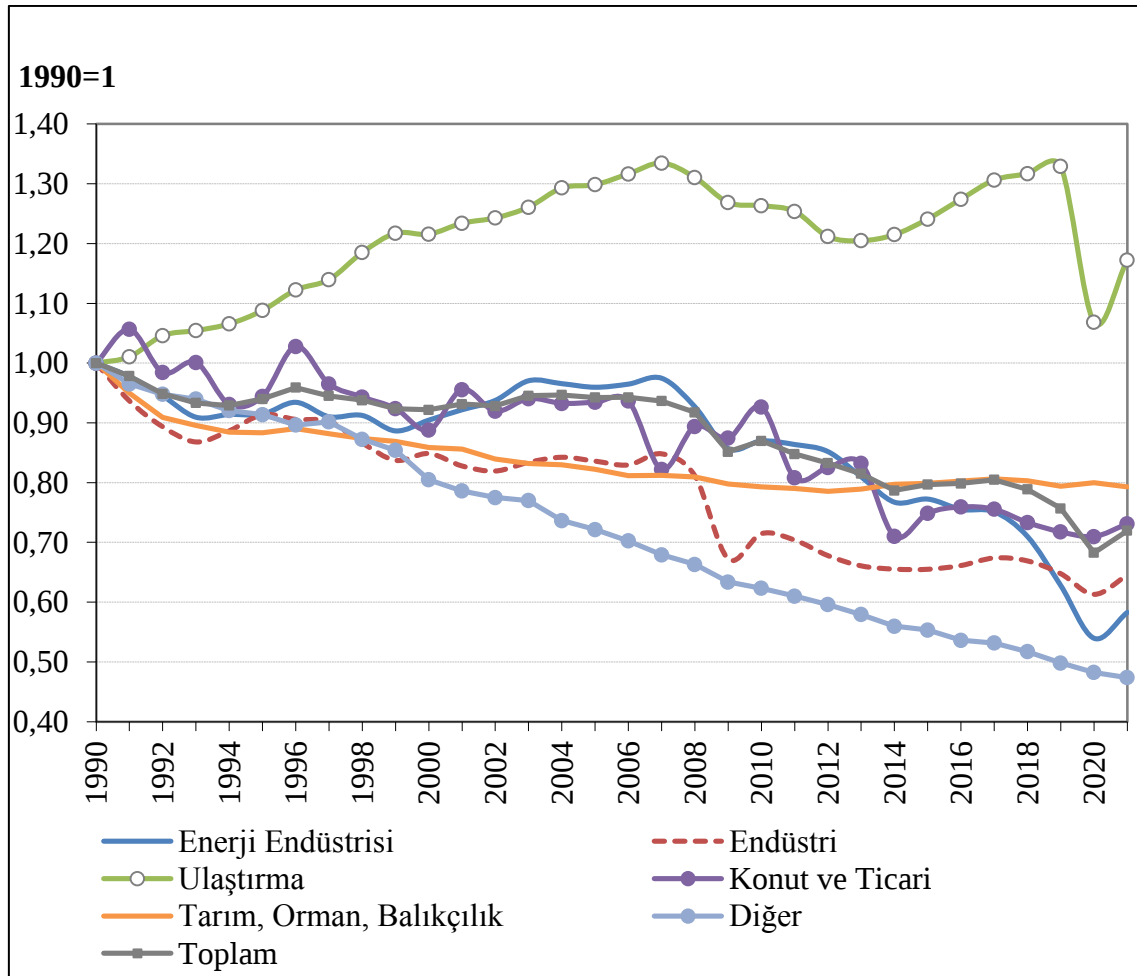
Enerji sektöründe fosil yakıtların elektrik üretimi ve ısı üretimi için öncelikli kullanılması nedeniyle sera gazı emisyonları oluşmaktadır. Kömür, doğal gaz ve petrol yakan enerji santralleri atmosfere önemli miktarda CO₂ salmaktadır. Ham petrolün benzin, dizel ve jet yakıtı gibi petrol ürünlerine rafine edilmesi de CO₂ yayan, enerji yoğun işlemler içermektedir. Güçlü bir sera gazı olan metan, doğal gazın çıkarılması, işlenmesi ve dağıtılması sırasında sızıntı yapabilmektedir. Ayrıca, endüstriyel süreçlerde ve binalarda ki enerji tüketimi de sera gazı emisyonlarına katkıda bulunmaktadır.

Endüstri sektöründe, çimento, çelik, kimyasallar ve imalat gibi endüstriler, enerji yoğun süreçler ve fosil yakıtların hammadde olarak kullanılması nedeniyle sera gazı emisyonlarına önemli katkılarda bulunmaktadır. Diğer endüstriyel emisyon kaynakları arasında kimyasal reaksiyonlar (örneğin, çimento üretiminde kireç taşının ayrışması) ve soğutma ve iklimlendirme ekipmanlarından florlu gazların salınması yer almaktadır.

Tarım sektörü de metan ve nitröz oksit emisyonlarının önemli bir kaynağıdır. Geniş getiren hayvanlarda (sığır, koyun) enterik fermantasyon metan üretirken, gübre yönetimi ve pirinç ekimi metan ve nitröz oksit açığa çıkarmaktadır. Azot oksit emisyonları ise sentetik gübre kullanımından ve topraktaki organik maddenin ayrışmasından kaynaklanmaktadır.

Ulaştırma sektörü, başta taşıt hareketliliği için fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan CO₂ olmak üzere önemli bir sera gazı kaynağıdır. Karayolu taşımacılığında benzinli ve dizel motorlarla çalışan otomobiller, kamyonlar ve otobüsler CO₂ emisyonlarının en büyük nedenlerindendir. Jet yakıtı kullanan ticari uçaklar ile dizel veya ağır akaryakıtla çalışan gemiler ve dizel motorlarla çalışan trenler de atmosfere CO₂ ve diğer kirletici maddeleri salmaktadır.

Avrupa Birliği ülkelerinde 1990 yılı baz alındığında (1990=1) 2021 yılına kadar geçen süreçte sera gazı emisyonundaki en büyük artışın ulaştırma sektöründe olduğu Şekil 5'te görülmektedir. Aynı şekilde tüm sektörlerde COVID-19 salgınının etkisi 2018-2020 yılları arasında görülmekte olup en büyük düşüş ulaştırma modlarının kullanılmaması sebebiyle ulaştırma sektöründe olduğu göze çarpmaktadır.



Kaynak: (Eurostat, 2023).

Şekil 5. AB-27 Sektörlere göre Sera Gazı Emisyonu (1990=1).

Sektöre özgü sera gazı emisyonlarını anlamak, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, enerji verimliliğinin artırılması, düşük karbonlu ulaşım seçeneklerinin (örneğin elektrikli araçlar) teşvik edilmesi, karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin uygulanması ve sürdürülebilirliğin benimsenmesi gibi etkili azaltım stratejilerinin

geliştirilmesi için hayati önem taşımaktadır. Hükümetler, endüstriler ve bireylerin tümü, iklim değişikliğiyle mücadele etmek ve çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmek için bu sektörlerdeki emisyonların azaltılmasında kilit rol oynamaktadır.

3.2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının İklim Değişikliği Üzerindeki Etkisi

Yenilenebilir enerji kaynakları; karbon emisyonları ve çevre kirliliğinin azaltılması ile enerji güvenliğinin artırılması gibi faydaları beraberinde getirmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimi sırasında atmosfere sera gazları salınmamakta ve doğal kaynaklardan elde edilen enerjiyi kullanılması sebebiyle tükenme ihtimalleri bilimsel verilere göre çok azdır. Güneş ışığı, rüzgar, su akışı ve jeotermal ısı gibi kaynaklar sürdürülebilir enerji sağlar. Bu, fosil yakıtların aksine doğal kaynakların korunması ve gelecek nesillere önemli katkılar sağlamaktadır. Ayrıca, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir kaynaklar genellikle yerel olarak mevcuttur ve dağıtım ağına daha az bağımlılık gerektirirler. Bu da enerji arzının istikrarını artırırken jeopolitik riskleri azaltır.

Yenilenebilir enerji sektörü, yeni istihdam olanakları oluşturur ve ekonomik kalkınmayı teşvik eder. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve diğer yenilenebilir teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanması, geniş bir işgücüne ihtiyaç duyar. Ayrıca, yenilenebilir enerji yatırımları, yerel ekonomilere canlılık kazandırır ve yeşil ekonomiye geçişin teşvik edilmesine yardımcı olur.

Yenilenebilir enerji kaynakları, iklim değişikliği ile mücadele için bir uyum aracı olarak hizmet edebilir. Özellikle hidroelektrik enerji, su yönetimi ve taşkın kontrolü gibi iklim değişikliği ile ilgili riskleri azaltmaya yardımcı olabilir. Ayrıca, yenilenebilir enerji altyapısı, aşırı hava olaylarına dayanıklı şekilde tasarlanabilir.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

4.1. Enerji Verimliliğinin Değerlendirilmesine İlişkin Nicel Analiz Yöntemleri

Enerji verimliliği, belirli bir enerji girdisinin istenen bir çıktıyı elde etmek için ne kadar etkin şekilde kullanıldığını ifade etmektedir. Enerji verimliliğinin değerlendirilmesi ise hem endüstriyel tesislerde hem de binalarda enerji tüketimini optimize etmek ve kaynakları daha verimli bir şekilde kullanmak için mevcut durumun analiz edilmesi ve iyileştirme potansiyellerinin belirlenmesi için kullanılan çeşitli yöntemleri içermektedir.

Enerji verimliliğinin değerlendirilmesi için ilk olarak, enerji tüketimi ile ilgili verilerin toplanması gerekmektedir. Bu veriler elektrik, doğal gaz, yakıt gibi enerji kaynaklarının ne kadar tüketildiği ve bu enerji tüketiminin hangi süreçlerde veya faaliyetlerde gerçekleştiği ve ne kadar çıktı (örneğin, ürün, hizmet) elde edildiğinin belirlenmesini sağlamalıdır. Daha sonra enerji verimliliğini ölçmek için enerji yoğunluğu (birim başına enerji tüketimi), enerji kullanım etkinliği (beklenen çıktı için gerçekleşen enerji tüketimi) gibi belirli performans metrikleri belirlenmektedir. Verilerin toplanması ve performans metriklerinin belirlenmesinden sonra benzer süreçler, sektörler, endüstriyel işletmeler veya tesisler arasında Veri Zarflama Analizi (VZA) gibi yöntemlerle karşılaştırmalar yapılarak en verimli ve en iyi uygulamalar tanımlanmaya çalışılmaktadır.

Yapılan değerlendirme sonuçları esas alınarak, enerji verimliliğini artırmak için enerji tasarruflu ekipmanların kullanımı, süreç optimizasyonu, eğitim ve farkındalık programları gibi uygun iyileştirme stratejileri belirlenmektedir. Enerji maliyetlerini düşürmek, çevresel etkiyi azaltmak ve enerji güvenliğini sağlamak için belirlenen bu stratejiler modern enerji yönetimi uygulamalarına da temel teşkil etmektedir.

Veri Zarflama Analizi ve Türleri

Çoklu girdi ve çoklu çıktı ölçütlerini kullanarak verimlilik analizi yapmak için bir araştırma yöntemi olarak kullanılan VZA; temel olarak performans değerlendirmesi ve karşılaştırmalı analiz yapmak için kullanılmaktadır. Verimlilik analizinde kullanılan bu yöntem, özellikle verimliliği artırmak için iyileştirme potansiyeli olan süreçler, sektörler, endüstriyel işletmeler veya tesisler arasındaki farkları belirlemek için kullanılmaktadır (Gong ve Sickles, 1992).

VZA'nın temel prensibi, birimlerin (örneğin, hastaneler, okullar, bankalar veya üretim birimleri gibi) bir dizi giriş veya kaynak kullanarak ne kadar çıktı ürettiğini değerlendirmektir. Bu değerlendirme, birimlerin ne kadar etkin olduğunu ve kaynakları ne kadar verimli kullandığını anlamaya yardımcı olmaktadır (Halkos ve Tzeremes, 2007).

VZA'nın ana bileşenleri şunlardır:

Girdiler ve Çıktılar: VZA, analiz için kullanılan girdiler ve çıktılar arasında bir ilişki kurmaktadır. Girdiler, işletme veya birimin kullandığı kaynaklardır (örneğin, işgücü, sermaye, enerji). Çıktılar ise işletmenin veya birimin ürettiği sonuçlardır (örneğin, ürün miktarı, hizmet kalitesi).

Veri Zarfları: VZA, her birim için bir veri zarfı oluşturmakta ve bu zarflar, her bir birimin girdi ve çıktılarını sayısal olarak ifade etmektedir. Her girdi ve çıktı özelliği ağırlıklı olarak hesaplanmakta ve birimlerin göreceli verimliliğini değerlendirmek için kullanılmaktadır.

Verimlilik Değerlendirmesi: VZA, her birimin mevcut kaynaklarını ne kadar etkin kullandığını değerlendirmekte ve birimin "verimli" olarak kabul edilmesi için

başka bir birim tarafından verilen çıktı seviyesine ulaşmak için girdi kullanımının en aza indirilmesi gerekmektedir.

VZA'nın temel türleri şunlardır:

Birleşik (CCR) Modeli: Charnes, Cooper ve Rhodes tarafından geliştirilen bu model, birimin her girdi ve çıktı kombinasyonunun tam olarak verimli olup olmadığını değerlendiren bu modelde verimlilik sınırlarının çok kesin bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Birleşik Verimlilik Analizi (BCC) Modeli: Bu model, birimin optimum olmayan veya düşük verimliliğini dikkate almaktadır. CCR modelinin aksine BCC modeli, her birimin verimlilik sınırlarını daha esnek bir şekilde değerlendirmektedir.

VZA; özellikle endüstriyel mühendislik, işletme yönetimi, sağlık hizmetleri ve kamu yönetimi gibi alanlarda performans değerlendirmesi ve karar verme süreçlerinde yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Bu analiz yöntemi, kaynak kullanımını optimize etmek ve verimliliği artırmak için faydalı bilgiler sağlamaktadır (Seiford and Zhu, 2011).

VZA enerji verimliliğinin değerlendirilmesinde de sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Bu analiz yöntemi, enerji kaynaklarının verimli kullanımını ölçmek ve enerji tüketimini optimize etmek için yararlanılmaktadır. VZA özellikle farklı enerji tüketen birimlerin (örneğin, üretim tesisleri, hastaneler, belediyeler) verimliliğini karşılaştırmak ve en iyi uygulamaları belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır.

Enerji verimliliğinin değerlendirilmesinde VZA sonuçlarının kullanımı şu şekillerde olabilir:

Girdi ve Çıktılar: Enerji verimliliği değerlendirmesinde VZA, enerji tüketimi için girdi faktörlerini (örneğin, elektrik, yakıt) ve çıktıları (örneğin, ürün miktarı, hizmet) dikkate alarak birimlerin ne kadar enerjiyi verimli bir şekilde kullandığı belirlenebilmektedir.

Enerji Verimliliği Endeksleri: VZA, enerji verimliliği endekslerini hesaplamak için kullanılabilmektedir. Örneğin, belirli bir endüstride faaliyet gösteren farklı tesislerin enerji verimliliği endeksleri karşılaştırılarak en verimli olanların belirlenmesi mümkün olabilmektedir.

Enerji Tüketim Analizi: VZA, enerji tüketimini etkin bir şekilde değerlendirmek için kullanılabilmekte ve özellikle aynı sektördeki farklı birimlerin enerji tüketimini ve çıktıları karşılaştırmak ve potansiyel iyileştirme alanlarını belirlemek için kullanışlı bir yöntemdir.

VZA'nın enerji verimliliği değerlendirmesinde yukarıda bahsedilen CCR ve BCC modelleri kullanılabilmektedir. CCR Modeli enerji girdileri ve çıktılarının tam verimlilik sınırlarını belirlemek için kullanılabilmektedir. BCC Modeli ise enerji verimliliği değerlendirmesinde birimin optimum olmayan veya düşük verimliliğini değerlendirmek için kullanılmaktadır.

Enerji verimliliği üzerine yapılan çalışmalarda, VZA'nın enerji kullanımını optimize etme ve kaynakları verimli bir şekilde kullanma konularında önemli bir araç olduğu kabul edilmektedir.

Malmquist Üretkenlik Endeksi

Malmquist Üretkenlik Endeksi (MPI, Malmquist Productivity Index), birimlerin verimliliğini zamana bağlı şekilde ölçmek için kullanılmaktadır. İsveçli bir ekonomist olan Karl-Gustav Malmquist'in 1953 yılında geliştirdiği bu endeks, birimin verimliliğindeki değişiklikleri, genellikle iki farklı zaman dönemi arasında karşılaştırarak analiz etmektedir.

MPI'nın ana amacı, zaman içindeki üretkenlik artışını veya azalışını ölçerek birimin performansındaki değişimleri anlamaktır. Bu endeks genellikle VZA çerçevesinde kullanılır ve VZA'nın temelindeki matematiksel işlemleri içerir. Bu endeks, verimlilik değişimini teknik değişim ve etkinlik değişimleri olmak üzere iki ana bileşene ayırarak ölçülmesini sağlamaktadır. Teknik değişim, üretim teknolojisinin zamanla nasıl değiştiğini gösterirken, etkinlik değişimi ise birimin verimlilik potansiyelini ne kadar iyi kullanabildiğini yansıtmaktadır (Färe vd., 1994).

MPI'nın, genellikle iki dönem arasındaki verimlilik değişimini ölçmek için VZA ile hesaplanmaktadır. İki zaman aralığındaki üretkenlik seviyeleri, VZA ile karşılaştırılmakta ve birimlerin teknik değişim, etkinlik değişimi veya her ikisinin bir kombinasyonu sonucunda elde edilen toplam verimlilik değişimi hesaplanmaktadır (Färe vd., 1994).

1997 yılında VZA ve MPI'nın istenen ve istenmeyen çıktıların olduğu durumlarda (enerji tribünlerinin istenen enerjinin yanı sıra istemeyen atıkları da üretmesi gibi) verdiği sonuçların yetersizliği nedeniyle geliştirilen Malmquist-Luenberger Üretkenlik Endeksi de üretkenliğe ilişkin analizlerde tercih edilmektedir (Chung vd., 1997).

Özetlemek gerekirse, MPI, birimin zaman içindeki verimlilik değişimini anlamak için kullanılmakta olup işletmelerin veya sektörlerin üretkenliklerini analiz etmek ve performanslarını zamana bağlı şekilde izlemek için kullanılan bir endekstir.

4.2. Yenilenemez Enerji Kaynakları ile Enerji Verimliliği ve Üretkenliği İlişkisi

Yenilenemez enerji kaynakları ile enerji verimliliği ve üretkenliği arasındaki ilişki, sürdürülebilir enerji sistemleri ve çevresel etki bağlamında kritik bir öneme sahiptir. Fosil yakıtlar, nükleer enerji ve diğer yenilenemeyen kaynaklar, küresel enerji üretimine önemli ölçüde katkıda bulunan sınırlı kaynaklar olup bu kaynakların kullanımı çevresel bozulma, iklim değişikliği ve enerji güvenliği ile ilgili endişeleri artırmaktadır.

Yenilenemez enerji kaynaklarının dönüşüm süreçlerinde doğası gereği verimsizlikler bulunmaktadır. Örneğin, fosil yakıt bazlı enerji santrallerinin, ısıyı elektriğe dönüştürme konusunda %30 - %50 arasında verimlilik sınırları bulunmakta olup geri kalanı atık ısı olarak kaybolmaktadır. Ancak, teknolojik gelişmeler ve inovasyonlar, yenilenemez enerji kaynaklarının verimliliğinin artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, kombine çevrim gaz türbinlerindeki gelişmeler, doğal gaz santrallerinin verimliliğini artırmış, böylece üretilen elektrik birimi başına yakıt tüketimini ve emisyonları azaltmıştır.

4.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Enerji Verimliliği ve Üretkenliği İlişkisi

Enerji kullanımının optimize edilmesi ve daha fazla çıktının daha az enerjiyle elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen enerji verimliliği ve üretkenliğine ilişkin süreçlerle enerji sistemlerinin daha sürdürülebilir ve etkin hale getirilmesi sağlanarak kaynakların daha verimli kullanılması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, fosil yakıtların yerine çevre dostu ve sürdürülebilir enerji üretimini sağlamak için kullanılan

yenilenebilir enerji kaynakları, enerji sistemlerinin daha verimli hale getirilebilmesi açısından enerji verimliliği ve üretkenliği ile yakından ilgilidir.

Yenilenebilir kaynaklar yenilenemez kaynaklara göre daha temiz olup çevresel etkileri daha düşüktür. Bu kaynakların kullanımı, enerji üretimindeki olumsuz çevresel etkileri azaltırken, aynı zamanda daha verimli enerji üretimini de sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji sektöründeki teknolojik gelişmeler ve inovasyonlar, enerji verimliliği ve üretkenliğini artırmak için yeni fırsatlar sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, ulusal olarak üretilbildiği için enerji bağımsızlığını arttırmakta, dışa bağımlılığı azaltmakta, enerji güvenliğini sağlayarak enerji tedarik zincirinin çeşitlendirilmesinde büyük rol almaktadır.

Özetle, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji verimliliği ve üretkenliğiyle entegre edilmesi, enerji sisteminin daha sürdürülebilir ve çevre dostu hale getirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, söz konusu alandaki ilişkileri daha derinlemesine anlamak ve yenilenebilir enerji kaynaklarının etkili bir şekilde kullanılmasını teşvik etmek için akademik çalışmalar ve uygulamalı araştırmalar büyük önem arz etmektedir.

4.4. Enerji Politikalarının Enerji Verimliliği ve Üretkenliğine Etkisi

Bir ülke veya bölgede enerji verimliliği ve üretkenliği üzerinde önemli bir etkisi olan düzenleyici, mali veya teşvik temelli enerji politikaları, enerji ortamının şekillendirilmesinde, teknolojik gelişmelerin etkilenmesinde ve enerji kullanımını optimize etmek için davranış değişikliklerinin yönlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Enerji politikaları genellikle çeşitli sektörlerde enerji verimliliğini artırmayı amaçlayan düzenleyici standartları ve talimatları içermektedir. Örneğin, cihazlar, araçlar ve endüstriyel ekipmanlar için minimum enerji performansı standartlarının belirlenmesi,

reticileri daha enerji verimli ürünler üretmeye yönlendirebilmektedir. Benzer Şekilde, bina kuralları ve standartları, konut ve ticari binalar için enerji verimli tasarım ve inşaat uygulamalarını zorunlu kılarak ısıtma, soğutma ve aydınlatma için enerji tüketiminin azaltılmasını sağlayabilmektedir.

Söz konusu politikalar ile enerji verimliliği tedbirlerine ve teknolojilerine yapılan yatırımların teşvik edilmesi için mali teşvikler ve sübvansiyonlar sunulabilmektedir. Enerji verimliliği sağlayan teknolojileri benimseyen iŐletmelere ve bireylere yönelik vergi kredilendirme ve hibeleri ile düşük faizli krediler bu tür politikalara örnek gösterilebilir.

Enerji politikaları genellikle; temiz enerji teknolojileri ve enerji verimliliği yenilikleri alanında sektörler arasındaki enerji verimliliğini ve üretkenliği artıran çığır açıcı teknolojilerin, malzemelerin ve süreçlerin geliŐtirilmesini destekleyen araştırma ve geliştirme yatırımları için fon tahsisini sağlamaktadır. Bu durum daha verimli yenilenebilir enerji sistemlerinin, akıllı Şebeke teknolojilerinin ve enerji depolama çözümlerinin konuŐlandırılmasına yol açmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji karıŐımına entegrasyonunu teşvik eden enerji politikaları, dolaylı olarak enerji verimliliğini ve üretkenliğini de arttırmaktadır.

Karbon vergileri veya emisyon üst sınırı ve ticareti sistemleri gibi karbon fiyatlandırma mekanizmaları, işletmelerin sera gazı emisyonlarını azaltmaları ve enerji verimliliğini artırmaları için ekonomik teşvikler yaratmaktadır. Bu politikalar, karbon emisyonlarının çevresel maliyetlerini içselleŐtirerek endüstrileri daha temiz ve daha verimli teknolojilere yatırım yapmaya teşvik etmektedir. Emisyon ticareti programları, Şirketlerin emisyon izinlerini alıp satmasına olanak tanıyarak, emisyon azaltma

hedeflerini karşılamada esneklik sağlarken enerji verimliliği iyileştirmelerini de teşvik etmektedir.

Sonuç olarak, enerji politikaları, temiz enerji teknolojilerine yatırımları teşvik ederek, düzenleyici standartları belirleyerek, Ar-Ge girişimlerini destekleyerek ve tüketicilere bilgi vererek enerji verimliliğini ve üretkenlik iyileştirmelerini teşvik etmede önemli bir rol oynamaktadır. Etkili politika erevesi, ekonomik teşvikleri sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu hale getirerek daha verimli ve sürdürülebilir bir enerji geleceğine yönelik sistemli değişiklikleri yönlendirmektedir.

4.5. Enerji Verimliliğinin İklim Değişikliğine Etkisi

Enerji verimliliği önlemlerinin, sera gazı emisyonlarını ve küresel ısınmanın etkilerini azaltarak iklim değişikliğini doğrudan etkilemesi sebebiyle enerji verimliliği ile iklim değişikliği arasında birbiriyle bağlantılı bir ilişki bulunmaktadır.

Küresel sera gazı emisyonlarının önemli bir kısmı enerji üretimi, tüketimi ve ilgili faaliyetlerden kaynaklanmaktadır. Sanayi, ulaşım, binalar ve cihazlar gibi çeşitli sektörlerde enerji verimliliği arttırılarak, ekonomik faaliyet birimi başına tüketilen enerji miktarı önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

Enerji verimliliği önlemleri, fosil yakıtlara olan talebi azaltarak ve daha temiz enerji kaynaklarını teşvik ederek de bu emisyonları doğrudan azaltmaktadır. Bir başka deyişle, enerji verimliliği, düşük karbonlu bir ekonomiye geçişi kolaylaştırmada çok önemli bir rol oynamaktadır.

Sektörler arasında enerji kullanımının verimliliğini en st düzeye çıkarak, ekonomik büyüme ve kalkınmadan ödün vermeden enerji talebinde ve buna bağlı emisyonlarda önemli azalmalar sağlanabilmektedir. Ayrıca, enerji verimliliği önlemleri,

yenilenebilir enerji teknolojilerinin kullanımını yaygınlaştırarak iklim değişikliğini hafifletme çabalarına katkıda bulunan daha sürdürülebilir ve dayanıklı bir enerji altyapısının gelişimine destek olmaktadır.



BEŞİNCİ BÖLÜM

ENERJİ VERİMLİLİĞİNE İLİŞKİN KARAYOLU ULAŞIMI AÇISINDAN

NİCEL BİR ANALİZ

5.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Dünyada yaşanan enerji krizleri ve ekonomik yansımaları, enerjinin toplumsal öneminin hatırlanması için her zaman kritik dönüm noktaları olmuştur. Bunlardan 1973 yılında yaşanan petrol krizi, mevcut enerji kaynaklarını çeşitlendirme ve alternatif enerji kaynaklarını araştırma noktasında tüm ülkeleri arayışa yöneltmiştir. Özellikle fosil enerjiye bağımlılığı yüksek olan ülkeler, yeni sürdürülebilir enerji politikalarına odaklanmışlardır (Karagöl ve Kavaz, 2017).

Enerji tüketiminin ivmelenerek arttığı 21. yüzyılda, 2017 yılı verilerine göre temel enerji kaynaklarının %85'ini fosil yakıtlar (petrol, kömür, doğal gaz vb.) oluşturmaktadır (BP, 2018).

Dünya genelinde hali hazırda fosil yakıtlara bağımlılık yüksek düzeyde olmasına rağmen tüketilen enerjide payı %15-%20 düzeyinde olan yenilenebilir kaynakların ilerleyen süreçte kullanımının kayda değer ölçüde artacağı öngörülmektedir (Karagöl ve Kavaz, 2017).

Enerji verimliliğinin benimsenmesi son yıllarda popüler ve uygun maliyetli bir yaklaşım haline gelmiş, enerji kaynaklarına olan talebi azaltarak ülkelerin ekonomik kalkınmasına yardımcı olmuştur. Ulaştırma sektörünün ve özellikle karayolu taşımacılığının enerji tüketimindeki önemi düşünüldüğünde, bu sektördeki enerji verimliliğinin önemi daha da artmaktadır.

Bu çalışmanın hedefleri; “seçilmiş AB ülkelerinde karayolu taşımacılık sektöründeki enerji kullanımı, sektördeki hareketliliğin ürettiği sera gazı emisyonlarının

miktarı ve karayolu taşımacılığı yapan firmaların mali performansının incelenmesi, karayolu yük ve yolcu taşımacılık değerlerini esas alarak hareketliliğin değerlendirilmesi, sosyo-ekonomik ve çevresel açıdan verimli ülkeleri tespit ederek bu ülkeler için sektördeki farklılıkları analiz etmek” olarak belirlenmiştir.

Araştırmanın önemi bu noktada ortaya çıkmakta ve yapılacak nicel ve nitel analizler dâhilinde elde edilecek bulgular sonucunda, mevcut kaynakların çevre, enerji ve ekonomik açıdan ne ölçüde verimli ve üretken kullanıldığı belirlenerek, ülkemizde ve dünyada mevcut kaynakların daha etkin kılınmasına ilişkin politika setlerinin geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

En ucuz ve en temiz enerjinin “kullanmadığımız enerji” olduğu noktasından hareketle Avrupa Birliği yasalarındaki temel maddelerden biri enerji verimliliği olarak kabul edilmiştir. İklim değişikliğinin olumsuz etkileri de göz önüne alındığında daha az enerji kullanarak daha az maliyetlerle yeşil enerjiye geçilmesi ve daha az doğal kaynak kullanımı mümkün olacaktır (Avrupa Komisyonu, 2021). Bu bakış açısıyla yenilebilir enerji kaynakları odağında daha verimli enerji kullanımına ilişkin analizler, gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakma amaçlarına da hizmet edecektir.

5.2. Araştırmanın Evreni ve Örneklemi

Gelecek 50 yılda bizi bekleyen çok büyük enerji talebi dikkate alındığında, özellikle elektrik ve ulaşım sektörlerindeki enerji ihtiyacını karşılama noktasında mevcut kaynakların durumunun değerlendirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Örneğin ulaştırma sektörü birincil enerji kaynağı kullanımında %20 ile büyük paya sahipken, bu sektör CO₂ emisyonlarının ve benzeri atıkların en önemli kaynağını teşkil etmektedir. Enerji Bilgi Yönetim İdaresi (EIA) yaptığı projeksiyonlarda petrolün ulaştırma sektöründe %95 oranıyla baskın enerji kaynağı olacağı öngörülse de küresel iklim

değişikliği ve elektrikli araçlar gibi gelecekteki teknolojik gelişmeler, geçmiş trendlere dayalı bu tahminleri geçersiz kılacak gibi görünmektedir. Fosil yakıtları da içeren konvansiyonel enerji kaynakları, uranyumun mevcut rezervinin yanı sıra çevresel kaygılar nedeniyle kullanımındaki sınırlamalar, gelecek enerji kaynaklarının planlanmasında ve alternatifler geliştirilmesinde önem arz etmektedir (Goswami ve Kreith, 2016).

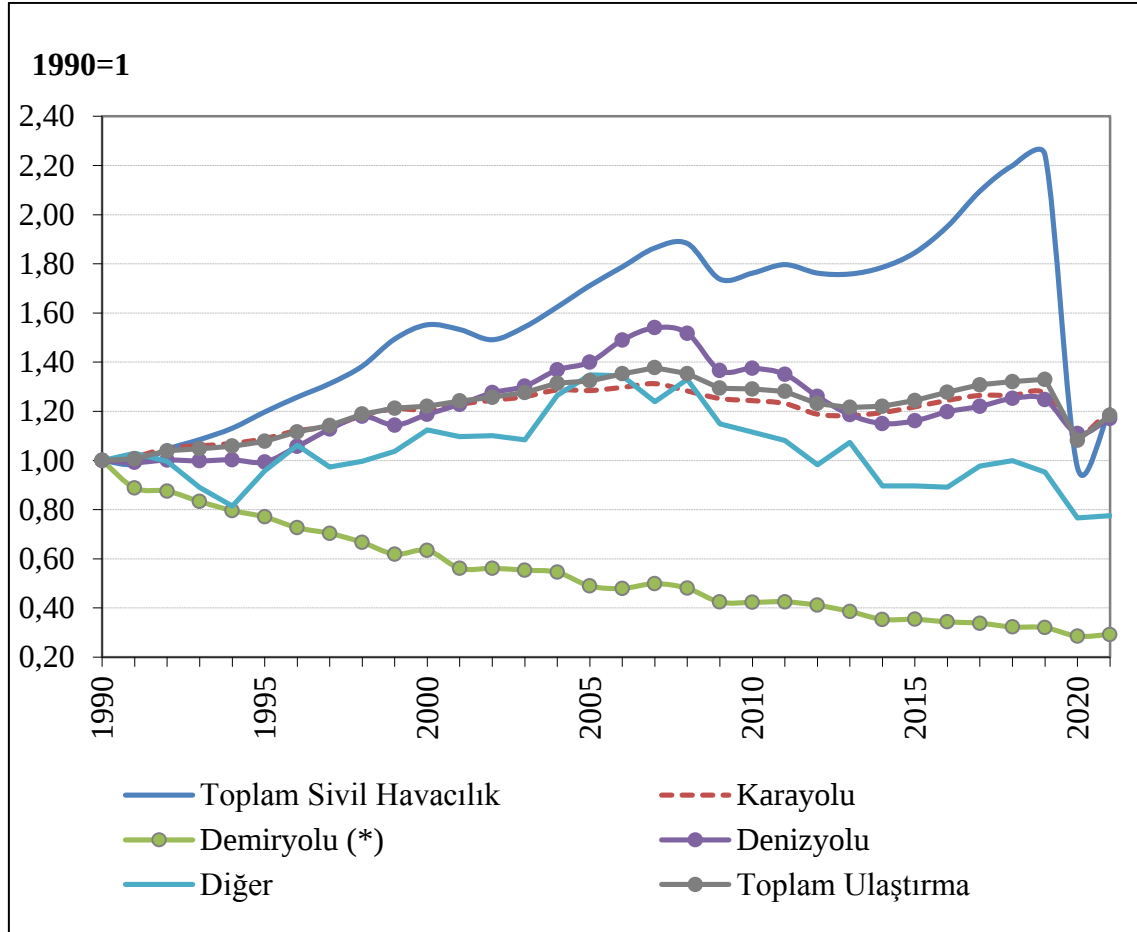
Bu kapsamda, bu tez çalışmasında enerji kaynağı kullanımında büyük bir paya sahip olan ulaştırma sektörünün en önemli alt sektörü olan karayolu sektöründeki altyapı yatırımlarının yapım, bakım ve işletme dönemlerini içeren yaşam döngüsünde karayolu sektörüne ilişkin istihdam, enerji tüketimi, ekonomik büyüklük, can kaybı ve yakıt tüketiminden kaynaklanan emisyonların göz önünde bulundurulacağı enerji, çevre ve ekonomik verimliliğinin modellenmesine ilişkin niceliksel analizler yapılacaktır.

Sera gazı emisyon salınımında çok büyük bir role sahip olan ulaştırma sektöründen kaynaklanan sera gazı (GHG) emisyonlarının azaltılması, iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için çok önemlidir.

Tablo 1. AB-27 Ulaştırmada Modlara göre Sera Gazı Emisyonları, Uluslararası Dahil (Milyon Ton CO2 Eşdeğer).

	Toplam Sivil Havacılık	Karayolu	Demiryolu	Denizyolu	Diğer	Toplam
1990	65,9	620,0	12,8	123,8	6,1	828,7
1995	78,9	675,5	9,9	123,1	5,8	893,2
2000	102,3	747,0	8,1	147,1	6,8	1011,4
2005	112,8	796,5	6,3	173,4	8,2	1097,2
2010	116,2	771,0	5,4	170,2	6,7	1069,6
2015	121,7	755,4	4,5	143,9	5,4	1030,9
2020	64,0	687,6	3,7	137,4	4,6	897,3
2021	79,6	747,9	3,8	145,1	4,7	980,9

Avrupa Birliği lkelerinde 1990 yılından 2021 yılına kadar geçen süreçte sera gazı emisyonunun ulaştırma sektöründe belirgin bir artış gösterdiği ve karayolu modundaki eğilimin de toplam ulaştırma sektörü ile aynı seyirde olduğu Tablo 1 ve şekil 6’da görülmektedir.



Kaynak: (Eurostat, 2023).

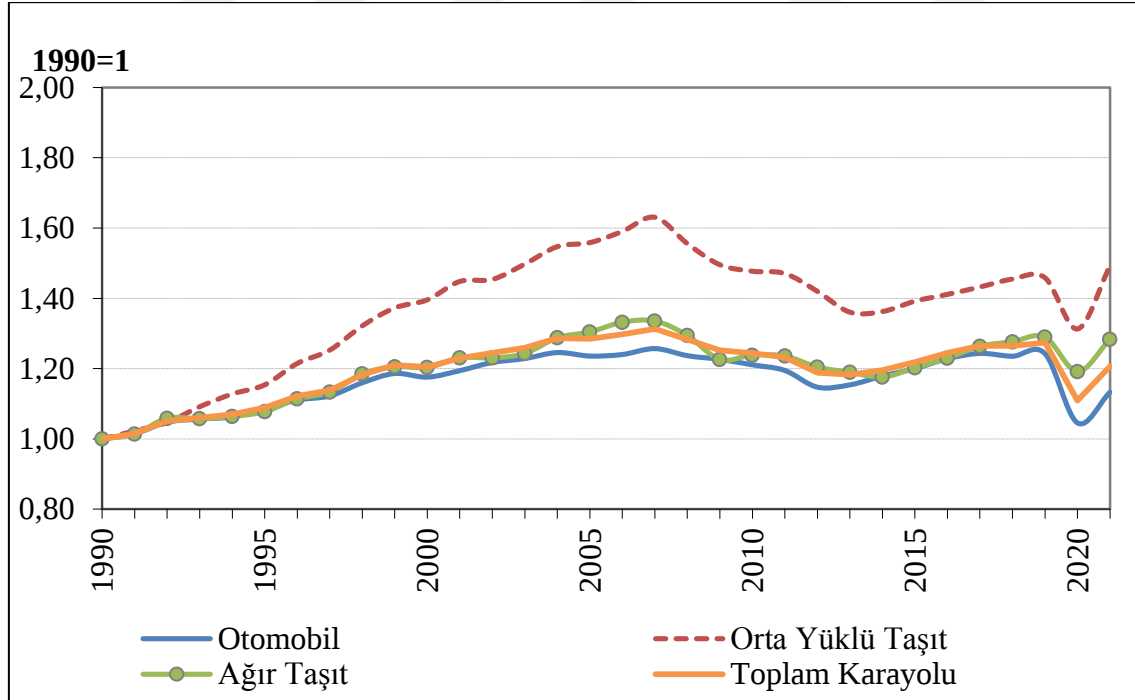
şekil 6. AB-27 Ulaştırmada Modlara göre Sera Gazı Emisyonları (1990=1), Uluslararası Dahil.

(*): Elektrik tüketiminden kaynaklı dolaylı emisyonlar hariç.

Tablo 2. AB-27 Karayolu Ulaştırmasında Taşıt Cinsine göre Sera Gazı Emisyonları (Milyon Ton CO₂ Eşdeğer).

Yıl	Toplam Karayolu	Otomobil	Orta Yüklü Taşıt	Ağır Taşıt	Motosiklet	Diğer
1990	620,0	388,9	59,1	163,1	8,6	0,4
1995	675,5	421,4	68,1	175,8	10,0	0,2
2000	747,0	457,2	82,4	196,2	11,0	0,1
2005	796,5	480,5	92,0	212,7	11,0	0,2
2010	771,0	470,8	87,2	202,0	10,9	0,1
2015	755,4	466,6	82,2	196,1	10,4	0,1
2020	687,6	406,6	77,5	194,4	9,0	0,1
2021	747,9	440,5	88,1	209,4	9,8	0,1

1990 yılı baz alındığında (1990=1) Avrupa Birliği ülkelerinde 2021 yılına kadar karayolu modundaki tüm taşıt cinslerinin sera gazı emisyon değerlerinde belirgin bir artış olduğu ve yalnızca COVID-19 salgını nedeniyle ilgili yıllarda bir azalış olduğu Tablo 2 ve Şekil 7’de görülmektedir.



Kaynak: (Eurostat, 2023).

Şekil 7. AB-27 Karayolu Ulaştırmasında Taşıt Cinslerine göre Sera Gazı Emisyonları (1990=1).

5.3. Karayolu Sektöründe Verimlilik Analizine İlişkin Literatür Çalışması

Karayolu taşımacılığında verimlilik akademisyenler tarafından yaygın şekilde araştırılmıştır. Farklı VZA modelleri, ana VZA modellerinden VZA yaklaşımlarının geliştirilmiş versiyonlarına kadar ülkelerin veya aynı ülkedeki bazı bölgelerin verimliliğini analiz etmek için kullanılmıştır.

Ramanathan (2000), Hindistan'daki farklı ulaşım modlarının enerji verimliliğini VZA yaklaşımıyla incelemiştir. Karayolu ve demiryolu taşımacılığındaki enerji verimliliğinin incelenmesi, yük ve yolcu taşımacılığında tüketilen enerjinin ayrıştırılması hakkında herhangi bir varsayımda bulunulmadan VZA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, demiryolu taşımacılığının enerji verimliliğinde kademeli bir ilerleme olduğu, karayolu taşımacılığının ise 80'lerin sonlarında 90'lara göre daha verimli olduğu tespit edilmiştir.

Boame (2004), Kanada'da 1990'dan 1998'e kadar kentsel ulaşım sisteminin teknik verimliliğini değerlendirmek için üç girdi kullanmıştır; Bunlar filodaki aktif otobüs sayısı, kullanılan yakıt/enerji ve ücretli çalışanların toplam çalışma saatleridir. Çıktılar ise gelir ve araç kilometrelerinden oluşmaktadır. Çalışmanın sonuçları, çoğu toplu taşıma sisteminin ölçek getirilerini artırdığını ortaya koymaktadır. Geliştirilmiş ortalama toplu taşıma hızları verimliliğin artmasına yol açarken yoğun saatlerin verimliliği azaltma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçların önceki VZA verimlilik araştırmasıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Karlaftis (2004), ABD genelindeki kentsel toplu taşıma sistemlerinin verimliliğini ve etkinliğini VZA kullanarak değerlendirmiştir. Girdiler; çalışan sayısı, toplam yıllık yakıt kullanımı ve toplu taşıma sistemi tarafından kullanılan toplam taşıt sayısı olarak seçilmiştir. Çıktılar; taşıt millerini ve yıllık toplam yolcu sayısını

içermektedir. Beş yıllık bir sürede ABD'deki 256 toplu taşıma sisteminden alınan verilerin analizi, verimlilik ve etkinlik arasında olumlu bir ilişki olduğunu göstermiştir.

Margari ve diğerleri (2007), çevresel ve düzenleyici faktörlerin İtalya'daki toplu taşımanın verimliliğini nasıl etkilediğini, birleşik üç aşamalı VZA-SFA (stokastik sınır) yöntemini kullanarak incelemiştir. Girdiler; personel sayısı, toplam yıllık yakıt tüketimi, ilişkili maliyetler ve genel işletme giderlerini (hem emek hem de yakıt maliyetlerini kapsar) içerirken, çıktılar; yıllık taşıt kilometreleri ve yıllık koltuk kilometrelerinden oluşmaktadır.

Sampaio ve diğerleri (2008), toplam personel, taşıt sayısı ve yıllık yakıt tüketimi (galon cinsinden) gibi girdileri kullanarak Veri Zarflama Analizi (VZA) ile toplu taşıma sistemlerinin kurumsal planlama için ne kadar etkili olduğunu araştırmıştır. Çıktılar taşıt/kat edilen mesafe ve yolcu sayısı/kat edilen mesafe açısından ölçülmüş, Recife'nin ulaşım sistemindeki değişiklikleri desteklemek için yüksek verimlilik gösteren sistemlerin özelliklerini vurgulamak üzere bir verimlilik analizi yapılmıştır.

Saxena ve Saxena (2011), Hindistan'daki toplu taşıma verimliliğini, filo boyutunu, toplam mürettebatı ve yakıt kullanımını girdi olarak, yolcu-km ve koltuk-km değerlerini de çıktı olarak kullanmıştır. Araştırma, verimlilik sıralamaları ve daha az verimli kuruluşlar için potansiyel iyileştirmeler dahil olmak üzere birkaç önemli konuyu vurgulamaktadır. Daha küçük operasyonların verimliliği artırmak için önemli fırsatlara sahip olduğu belirtilmektedir.

Shen ve diğerleri (2011), 1995'ten 2007'ye kadar AB'de sürdürülebilir karayolu taşımacılığıyla ilgili beklenmeyen sonuçlardaki değişiklikleri, girdi olarak yolcu ve yük taşımacılığını ve çıktı olarak toplam enerji kullanımını, sera gazı emisyonlarını ve kazalardaki ölümleri kullanarak analiz etmiştir. Ülkelerin sürdürülebilir karayolu

taşımacılığında verimliliği ne ölçüde artırdığı, VZA ve MPI aracılığıyla değerlendirilmiştir. Bu endeks üretkenlik ve teknik değişim bölümlerinden oluşmaktadır. Bu nedenle, odak noktası gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasındaki boşluğu kapatmak değil tüm ülkelerde ulaşım verimliliğini artırmaktır.

Chang ve diğerleri (2013), girdi değişkenleri olarak emek, sermaye ve enerjiyi kullanırken, çıktı olarak katma değeri ve CO₂ emisyonlarını dikkate alarak SBM VZA aracılığıyla Çin'in ulaşım sisteminin çevresel performansını araştırmıştır. Bulgular, Çin'deki eyaletlerin çoğunun çevresel olarak verimli bir ulaşım sektörüne sahip olmadığını ortaya koymuştur. Birkaç eyalette, çevresel verimlilik derecesi amaçlanan veya istenen seviyenin yüzde 50'sinin altında olduğu belirlenmiştir.

Cui ve Li (2014), girdi olarak emek, sermaye ve enerjiyi dikkate alarak ve çıktıları yük (ton-km) ve yolcu (yolcu-km) taşımacılığı açısından ölçerek Çin'deki otuz eyaletteki taşımacılığın enerji verimliliğini üç aşamalı (VZA) bir model kullanarak araştırmıştır. Sonuçlar, taşımacılık yapısının ve yönetim stratejilerinin taşımacılık sektörünün enerji verimliliğini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Song ve diğerleri (2015), girdileri emek, sermaye ve enerji ve çıktıları katma değer ve CO₂ emisyonlarından oluşan istenmeyen çıktıları içeren bir SBM VZA modeli kullanarak Çin'deki ulaşım sektörünün çevresel verimliliğini araştırmıştır. Bulgular, Çin'deki kentlerin çoğunun verimsiz ulaşım sistemlerine sahip olduğunu ve bunun düşük ortalama çevresel verimliliğe yol açtığını ortaya koymuştur. Ayrıca, çalışma genel olarak ulaşım verimliliğinin doğu Çin'de merkez ve batı bölgelerine kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Li ve diğerleri (2016), ulaşım yatırımının Çin'deki bölgesel entegre ulaşım sistemlerinin verimliliğini nasıl etkilediğini, girdi olarak emek, sermaye, enerji ve

GSYH'yi kullanırken ciro ve CO₂ emisyonlarını çıktı olarak kullanarak incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, Çin'deki kentlerin çoğunun çalışma süresi boyunca ulaşım sistemlerinde verimli bir şekilde çalışmadığını ve Çin'in genel ortalama toplam faktör ulaşım verimliliğinin düşük kalmaya devam ettiği tespit edilmiştir.

Li ve diğerleri (2016) ağ uzunluğu ve toplam personeli girdi olarak, yolcu sayıları, yük hacimleri ve emisyonları çıktı olarak almış, VZA kullanarak Çin'deki bölgesel entegre taşımacılığın etkinliğini değerlendirmiştir. Sonuç olarak, yazarlar gelecekte Çin'deki ulaşım ağının iyileştirilmesinin ulaşım ağı çerçevesinin yeniden yapılandırılmasına ve optimize edilmesine odaklanması gerektiğini, özellikle açık ve verimli bir entegre ulaşım sisteminin kurulmasının vurgulanması gerektiğini belirtmektedir.

Stefaniec ve diğerleri (2016) GSYH, kişi başına GSYH, yol ağının uzunluğuna göre binek otomobil sayısı, nüfus yoğunluğu, 1.000 kişiye düşen binek otomobil, yol ağının uzunluğu, istihdam seviyeleri ve hane halkı ulaşım giderleri gibi çeşitli girdileri analiz ederken, iç ulaşımın sürdürülebilirliğini değerlendirmek için yolcu taşımacılığı, trafik kazaları ve sera gazı emisyonları gibi çıktıları değerlendirmiştir. Bulgular araştırma süresince ulaşım verimliliğinde genel bir iyileşme olduğunu gösterse de bu araştırma Çin'de verimlilik iyileştirmelerinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

Wang'ın (2019) çalışmasında, girdiler altyapı ve bakıma yapılan genel yatırımlarla birlikte toplam yol uzunluğundan oluşurken, çıktılar yolcu ve yük taşımacılığı, PM2.5 ve CO₂ emisyonları ve can kayıplarını içermektedir. 24 OECD ülkesinde karayolu taşımacılığının sürdürülebilirliğini değerlendirmek için hem çevresel etkiler hem de güvenlik faktörleri dikkate alınarak VZA kullanılmıştır.

Tian ve diğerkleri (2020), Çin'in Shaanxi Eyaletinde bölgesel taşımacılığın sürdürülebilirliğini değerlendirmek için SBM VZA'yı uygulamıştır. Girdi faktörleri arasında otoyol uzunluğu, iş gücü büyüklüğü, enerji tüketimi, sabit varlık yatırımı, otoyollardaki düzenli kamyon sayısı, otoyollardaki düzenli yolcu taşıtları sayısı ve ulaşım için arazi tahsisi yer alırken; çıktı faktörleri arasında yük kapasitesi, yolcu kapasitesi, yolcu-kilometre, ton-kilometre yer almaktadır.

Hussain ve diğerkleri (2022) sürdürülebilir ulaşımın verimliliğini ve sosyo-ekonomik değişkenleri; girdi olarak yol altyapısı yatırımı, demiryolu altyapısına yatırımlar, yol yoğunluğu ve demiryolu yoğunluğunu, çıktı olarak; karayolu yolcuları, demiryolu yolcuları, karayolu yükü, demiryolu yükü, ulaşım katma değeri, ulaşım istihdamı ve hem karayolu hem de demiryolundan kaynaklanan CO₂ emisyonlarını olarak değerlendirme yapmıştır. OECD ülkelerinin inceleme döneminde yüksek ekonomik verimlilik derecelendirmeleriyle olağanüstü bir performans sergilediği görülmüştür. Ekonometrik analiz, sosyo-ekonomik faktörlerin sürdürülebilir ulaşım verimliliğini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır.

Wang ve diğerkleri (2022), 25 OECD ülkesinde kara taşımacılığının çevresel değerlendirmesi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Yazarlar; girdi olarak altyapı yatırımı ve bakımı, ulaşım güzergah uzunlukları, emek ve genel enerji tüketimini yük taşımacılığı, yolcu taşımacılığı ve CO₂ emisyonları gibi istenmeyen çıktıları da modellerinde kullanmışlardır. Tanıtılan model, önemli bir zaman gerektirmesine rağmen çevresel olarak hassas karar alma birimlerini (KVB'ler) etkili bir şekilde belirleme yeteneğine sahiptir. Araştırmanın bulguları, incelenen önlemlere ilişkin fikir vermekte ve OECD ülkeleri içinde karayolu taşımacılığının verimliliğinin artırılmasına yönelik öneriler sunmaktadır.

Gökgöz ve Yalçın (2024) AB ulaştırma sektörünün performansı ve verimliliği üzerine analizler yapmıştır. Bu araştırmada Avrupa Birliği ülkeleri, kişi başına düşen GSYH rakamlarına göre gelişmiş veya gelişmekte olan olarak sınıflandırılmıştır. PIV, ROV, MOORA ve MPI tekniklerini uygulamak için sera gazı, istihdam, katma değer, toplam ulaştırma yatırımı ve toplam ulaştırma ölümleri olmak üzere beş değişken kullanmışlardır. Bu analizin sonuçlarını kendi geliştirdikleri Çok Kriterli Karar Verme (MCDM, Multi-Criteria Decision-Making) modeli ile ağırlıklandırarak yorumlamışlardır. MCDM analizi, daha yüksek gelire sahip ülkelerin AB'deki muadillerinden önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle ulaştırma sektörüne önemli miktarda kaynak ayıran ülkelerin, daha yüksek enerji tüketimlerine rağmen daha başarılı oldukları dikkat çekmektedir.

Kaleibar ve Krmac (2024), sekiz farklı girdi kullanarak Avrupa Karayolu Taşımacılığı Sistemlerinin performansını değerlendirmiştir. Bunlara karayolu yük ve yolcu taşımacılığı ve tüm yol türlerinin toplam uzunluğu (ana veya ulusal yollar, küçük veya bölgesel yollar, diğer yollar ve otoyolları kapsar) ile yolcu sayısı ve yakıt türüne göre sınıflandırılmış karayolu taşımacılığındaki genel enerji tüketimi dahildir. Çıktılar arasında karayolu yük taşımacılığı, karayolu yolcu taşımacılığı hem ulusal hem de uluslararası taşıma hacimleri, kaynak sektörüne göre farklılaştırılmış sera gazı emisyonları, daha yüksek düzeyde gürültü kirliliğine maruz kalan kişi sayısı ve çeşitli ülkelerde yaralanmalara ve ölümlere neden olan karayolu trafik kazalarının sayısı yer almaktadır.

Bu çalışmada, süper-SBM VZA yaklaşımı uygulanarak Avrupa Birliği ülkelerine yönelik bir bakış sunmak için karayolu taşımacılığı çevresel, enerji ve ekonomik verimlilik açısından analiz edilmiştir.

5.4. Araştırmanın Yöntemi

Literatür çalışmasında belirtildiği üzere karayolu taşımacılığına ilişkin verimlilik analizlerinde klasik VZA'nın yanı sıra farklı VZA yöntemleri de kullanılmıştır. Bilindiği üzere VZA kavramı, Farrell'in verimlilik etkinliği kavramını ortaya koyduğu araştırmasından kaynaklanmaktadır (Farrell, 1957). Yaklaşık yirmi yıl sonra, ilk VZA modeli 1978 yılında Charnes, Cooper ve Rhodes (CCR) tarafından kurulmuştur. Bu modelde, bilinmeyen ağırlıklar kullanılarak verimliliği ölçülecek olan her KVB için sanal girdi ve çıktılar oluşturulur. Ağırlıkları bulmak için doğrusal programlama kullanılır. Modelde, çıktı/girdi maksimizasyonu amaç fonksiyonuna dahil edilir. Sınırlayıcı koşul, etkinliği ölçülecek olan tüm KVB'lerin çıktı/girdi oranlarının 1'den küçük veya 1'e eşit olmasıdır. Bu fraksiyonel programlama doğrusal programlamaya dönüştürüldüğünde ve dualize edildiğinde temel VZA modeli CCR elde edilir. Model her bir KVB için kullanıldığında, amaç fonksiyonu değeri 1 olan birimler etkin, 1'den küçük olanlar ise etkinsiz olarak adlandırılır. Dolayısıyla, etkinlik sıralamaları değerlendirilirken ve etki faktörleri analiz edilirken, bu etkin KVB'leri ayırt etmek önemlidir. CCR modeli CRS öncülü altında çalışmaktadır. CCR modelinin kurulmasının ardından, çeşitli araştırmalarda modele çok sayıda iyileştirme dahil edilmiştir (Düzakın, 2009).

Bu araştırma için VZA modelinin bir türü olan Süper-SBM modeli kullanılmıştır. Model, Tone tarafından 2001 yılında oluşturulan SBM modeli üzerine kurulmuştur. Süper-SBM'de etkinlik sonuçları 1'den büyük olabilmekte, bu da etkin birimlerin kendi içinde sınıflandırılmasını mümkün kılmaktadır. Süper-SBM çerçevesini kullanan ve istenmeyen çıktıları hem amaç hem de kısıt fonksiyonlarına entegre eden Süper-SBM-VZA modeli, Süper-SBM-VZA çerçevesinde ölçülen bu istenmeyen çıktıları aşağıdaki şekilde değerlendirmektedir:

$$\bar{x} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij},$$

$$\bar{y} \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj},$$

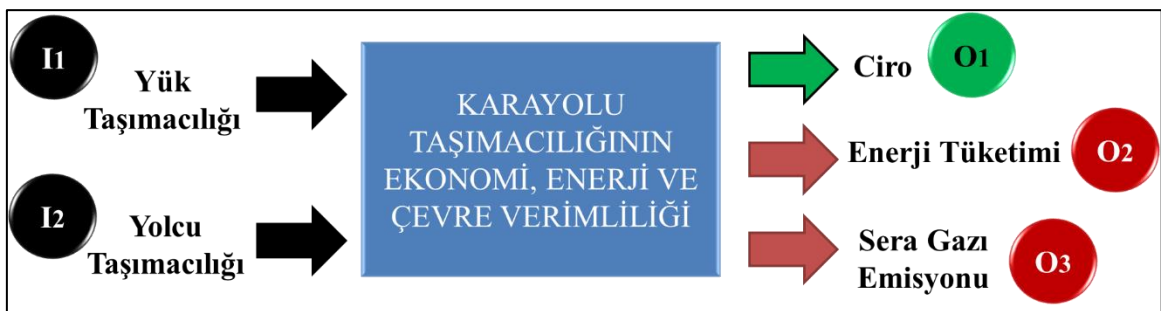
$$\bar{x} \geq x_0, \bar{y} \leq y_0,$$

$$\lambda, \bar{x}, \bar{y} \geq 0, i = 1, 2 \dots m, j = 1, 2 \dots n, r = 1, 2 \dots s,$$

olmak üzere;

$$\min \rho = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^- / x_{io}}{\frac{1}{s} \sum_{r=1}^s y_r^- / y_{ro}} \quad (1)$$

Bu bağlamda, ρ performans puanı, x ve y sırasıyla girdi ve çıktı değişkenleri, m ve s sırasıyla girdi ve çıktı değişkenlerinin kategorileridir. Bu çalışmada iki model kullanılmış olup analizde Süper-SBM VZA yönteminden faydalanılmıştır. Birinci modele 25 Avrupa Birliği ülkesi dahil edilmiş ve modele ait görsel aşağıda yer almakta olup yük ve yolcu taşımacılığı girdiler, ciro, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonu çıktıları olarak kullanılmıştır.



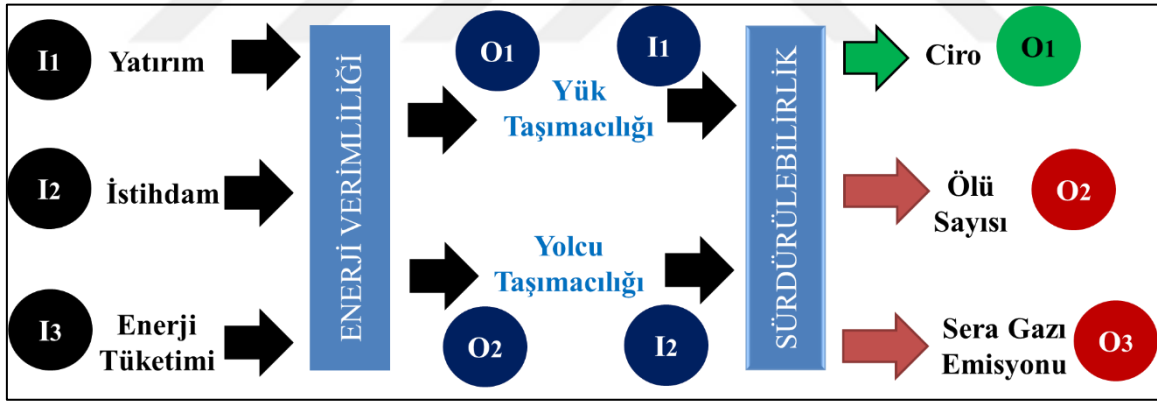
Şekil 8. Model 1'e Ait Görsel.

İkinci modelde ise 20 Avrupa Birliği ülkesi için iki aşamalı analiz gerçekleştirilmiştir. İkinci modelde yer alan aşamalar aşağıda açıklanmıştır:

Aşama 1: Bu aşamada üç girdi değişkeni yatırım, istihdam ve enerji kullanımı iken çıktı değişkenleri yolcu-kilometre ve yük-kilometredir. Bunu takiben, bir KVB'nin enerji verimliliğini değerlendirmek için bir VZA modeli kullanılır. Çıktı değerleri ne kadar yüksekse, KVB o kadar enerji verimlidir.

Aşama 2: Bu aşamada, Aşama 1'den elde edilen çıktılar (yolcu-km ve yük-km) girdi değişkenleri olarak kullanılırken, sera gazı emisyonları, ölümler ve ciro çıktı değişkenleri olarak ele alınmaktadır. Daha sonra, KVB'nin sürdürülebilirliğini değerlendirmek için bir VZA modeli kullanılır.

Bu çalışmada Seiford ve Zhu tarafından 1999 yılında geliştirilen modele benzer iki aşamalı bir model kullanılmıştır. Ancak, Seiford ve Zhu'nun modeli standart bir VZA modeli olarak nitelendirilmektedir. Bu çalışmada kullanılan iki aşamalı VZA modeli Şekil 9'da yer almaktadır.



Şekil 9. Model 2'ye Ait İki Aşamalı Analiz Görseli.

5.5. Veri Analizi

5.5.1. Veriler ve Değişkenler

Metodolojide bahsedildiği gibi çalışma iki modelden oluşmaktadır. Analiz için AB-27 ülke Kişi Başı GSYH (PPS)'ye göre iki gruba ayrılmıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Kişi Başı GSYH (PPS) (AB-27=100).

	2020	2021
Lüksemburg	263	268
İrlanda	209	218
Danimarka	135	133
Hollanda	132	129
Avusturya	124	123
İsveç	123	123
Almanya	123	120
Belçika	119	120
Finlandiya	114	112
Fransa	104	104
	100	
İtalya	94	95
Çekya	93	92
Slovenya	89	90
Kıbrıs	88	91
Litvanya	87	89
İspanya	84	83
Estonya	84	89
Portekiz	76	75
Polonya	76	77
Macaristan	74	75
Romanya	72	74
Letonya	70	72
Slovakya	70	71
Hırvatistan	64	70
Yunanistan	62	64
Bulgaristan	55	57

Çalışmanın ilk modelinde, 2020 ile 2021 yılları arasında 25 AB ülkesinin çevre, enerji ve ekonomik verimliliği ölçülmüş olup değişkenler, verilerin mevcudiyetine göre seçilmiştir. Malta ve Kıbrıs analize dahil edilmeyen ülkelerdir. Bu çalışmada analiz edilen ülkeler, PPS cinsinden kişi başına GSYH'ye göre iki gruba ayrılmıştır. İlk gruptaki ülkeler, PPS cinsinden kişi başına GSYH'si AB-27 ortalamasının üzerinde olan 10 ülke iken, ikinci gruptaki ülkeler, PPS cinsinden kişi başına GSYH'si AB-27 ortalamasının altında olan 15 ülkedir.

Tablo 4. Model 1 İçin Veri Açıklamaları ve Kaynaklar.

İsim	Açıklama	Birim	Kaynak
Yük Taşımacılığı	2020-2021 yılları arasında herhangi bir araçla her ülkenin sınırları içerisinde yapılan karayolu taşımacılığı	Milyar ton-km cinsinden (1 ton yükün 1 kilometre taşınmasının ölçü birimi)	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024))
Yolcu Taşımacılığı	2020-2021 yılları arasında her ülkenin kendi toprakları içerisinde gerçekleştirilen karayolu yolcu taşımacılığı	Milyar yolcu-km cinsinden (1 yolcunun 1 kilometre taşınmasının ölçü birimi)	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024)
Enerji Tüketimi	2020-2021 yılları arasında her ülkenin yol sektörüne göre nihai enerji tüketimi	Milyon Ton Eşdeğer Yakıt (MTEY)	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024)
Sera Gazı Emisyonları	2020-2021 yılları arasında her ülkenin yol sektörü kaynaklı sera gazı emisyonları	Milyon Ton CO ₂ Eşdeğeri	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024)
Ciro	2020-2021 yılları arasında ülkelere göre ana faaliyeti karayolu taşımacılığı olan şirketlerin ciroları	Milyon Euro	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024)

Modelde kullanılan verilere ilişkin bilgiler Tablo 4’te çalışmanın girdileri ve çıktıları ise Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Model 1 İçin Girdiler ve Çıktılar.

Girdi 1	Yük Taşımacılığı
Girdi 2	Yolcu Taşımacılığı
Çıktı 1 (İstenmeyen)	Enerji Tüketimi
Çıktı 2 (İstenmeyen)	Sera Gazı Emisyonları
Çıktı 3	Ciro

İkinci model analizinde ise 20 AB ülkesinin çevre, enerji ve ekonomik verimliliği 2020-2021 dönemi için ölçülmüştür. Değişkenler veri mevcudiyetine göre

seçilmiş olup verileri eksik olan ülkeler (Malta, Danimarka, Lüksemburg, Kıbrıs, Portekiz, Romanya, Slovakya) analize dahil edilmemiştir.

“EU Transport on Figures” ve OECD veri kaynakları AB tarafından her yıl düzenli olarak yayınlanmaktadır. Bu çalışmada analiz edilen ülkeler PPS cinsinden kişi başına GSYH'ye göre iki gruba ayrılmıştır. Birinci grup, PPS cinsinden kişi başına GSYH'si AB-27 ortalamasının üzerinde olan 8 ülkeden, ikinci grup ise PPS cinsinden kişi başına GSYH'si AB-27 ortalamasının altında olan 12 ülkeden oluşmaktadır.

Metodolojide de belirtildiği gibi, bu çalışmadaki model, iki aşamadan oluşmaktadır ve daha güvenilir sonuçlar elde etmek için 20 AB ülkesi, gelişmişlik düzeylerine göre iki gruba ayrılmıştır. 1. aşamada; istihdam, yatırım ve toplam enerji tüketimi girdileri kullanılarak karayolu sektöründeki enerji verimliliği hesaplanmış olup analizin ana çıktısı yolcu-km ve yük-km'dir. Aşama 1 için veri açıklamaları ve kaynaklar Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Model 2'nin 1. Aşaması İçin Veri Açıklamaları ve Kaynaklar.

Veri Adı	Açıklama	Birim	Kaynak
İstihdam	20 Avrupa ülkesinin 2020-2021 yılları için karayolu taşımacılığı istihdam verileri	Bin	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024)
Yatırım	20 Avrupa ülkesinin 2020-2021 yılları için karayolu taşımacılığı yatırım verileri	Euro	OECD
Toplam Enerji Tüketimi	20 Avrupa ülkesinin 2020-2021 yılları için karayolu taşımacılığı toplam enerji tüketimi verileri	Milyon Ton Eşdeğer Yakıt (MTEY)	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024)
Yolcu-Km	20 Avrupa ülkesinin 2020-2021 yılları için karayolu taşımacılığı yolcu-km verileri	Milyar yolcu-km	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024)
Yük-Km	20 Avrupa ülkesinin 2020-2021 yılları için karayolu taşımacılığı yük-km verileri	Milyar ton-km	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024)

Aşama 1'de çıktı olarak elde edilen veriler (yolcu-km, yük-km) aşama 2'de girdi olarak kullanılmıştır. Bu aşamada; emisyon, ölüm sayısı ve ciro çıktı verileri ile sürdürülebilir karayolu taşımacılığı verimliliği araştırılmıştır. Aşama 2 için veri açıklamaları ve kaynaklar aşağıdaki Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Model 2'nin 2. Aşaması İçin Veri Açıklamaları ve Kaynaklar.

Veri Adı	Açıklama	Birim	Kaynak
Yolcu-Km	20 Avrupa ülkesinin 2020-2021 yılları için karayolu taşımacılığı yolcu-km verileri	Milyar Yolcu-km	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024)
Yük-Km	20 Avrupa ülkesinin 2020-2021 yılları için karayolu taşımacılığı yolcu-km verileri	Milyar Ton-km	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024)
Emisyon	20 Avrupa ülkesinin 2020-2021 yılları için karayolu taşımacılığı sera gazı emisyon verileri	Milyon ton CO_2 eşdeğeri	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024)
Ölüm Sayıları	20 Avrupa ülkesinin 2020-2021 yılları için karayollarında gerçekleşen toplam ölüm sayısı verileri	kişi	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024)
Ciro	20 Avrupa ülkesinin 2020-2021 yılları için karayolu taşımacılığı toplam ciro verileri	Milyon Euro	Statistical Pocketbook EU Transport in Figures (2018-2024)

Model 2'nin 1. aşamasına ilişkin girdiler ve çıktılar aşağıdaki Tablo 8'de özetlenmiştir.

Tablo 8. Model 2'nin 1. Aşaması İçin Girdiler ve Çıktılar.

Modelin Girdileri ve Çıktıları	
Girdiler	- Yatırımlar - İstihdam - Toplam Enerji Tüketimi
Çıktılar	- Yolcu-Km - Yük-Km

Model 2'nin 2. aşamasının girdileri ve çıktıları Tablo 9'da özetlenmiştir.

Tablo 9. Model 2'nin 2. Aşaması İçin Girdiler ve Çıktılar.

Modelin Girdileri ve Çıktıları	
Girdiler	- Yolcu-Km - Yük-Km
Çıktılar	- Sera Gazı Emisyonları (İstenmeyen) - Ölüm Sayıları (İstenmeyen) - Ciro

5.5.2. Tanımlayıcı İstatistikler

Model 1’de tüm göstergeler için, PPS cinsinden kişi başına GSYH’si AB-27 ortalamasının üzerinde olan birinci gruptaki ülkelerin ortalama değeri, PPS cinsinden kişi başına GSYH’si AB-27 ortalamasının altında olan ikinci gruptaki ülkelerin ortalama değerinden yüksektir. Bu tez çalışmasında birinci gruptaki ülkeler “gelişmiş”, ikinci gruptaki ülkeler ise “gelişmekte olan” olarak adlandırılmıştır. Gelişmiş ülkelerin 2020-2021 yıllarına ait ortalama ve standart sapma değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo10).

Tablo 10. Model 1’deki Gelişmiş Ülkelerin Ortalama ve Standart Sapma Değerleri.

Yıl	Yük Taşımacılığı		Yolcu Taşımacılığı		Enerji Tüketimi		Sera Gazı Emisyonları		Ciro	
	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS
2020	101.5	143.2	209.3	277.0	12.7	15.3	36.4	44.9	82404.6	92201.8
2021	105.9	148.0	218.8	288.4	13.4	16.1	38.1	47.2	98015.3	109894.3

Gelişmekte olan ülkelerin 2020-2021 yıllarına ait ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 11’de yer almaktadır.

Tablo 11. Model 1’deki Gelişmekte Olan Ülkelerin Ortalama ve Standart Sapma Değerleri.

Yıl	Yük Taşımacılığı		Yolcu Taşımacılığı		Enerji Tüketimi		Sera Gazı Emisyonları		Ciro	
	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS
2020	48.6	66.6	118.2	141.9	7.4	8.5	21.6	25.0	29470.3	38978.2
2021	53.5	73.3	124.7	151.2	8.3	10.0	24.3	29.4	34637.0	46539.5

AB-27 için tüm modlara göre yük taşımacılığının dağılımı Tablo 12’de gösterilmiştir. Tablodan görülebileceği gibi yük taşımacılığında lider mod karayolu taşımacılığıdır.

Tablo 12. AB-27 Modlara göre Yük Taşımacılığı Performansları.

Yıl	Karayolu	Demiryolu	Boru Hatları	Denizyolu	Havayolu
2020	53,2%	11,7%	2,8%	32,4%	0,1%
2021	53,8%	12,0%	2,6%	32,3%	0,1%

Tüm modlara göre AB-27 için yolcu taşımacılığının oranları Tablo 13'te verilmiştir. Görüldüğü üzere yolcu taşımacılığında en büyük paya sahip mod karayolu taşımacılığıdır.

Tablo 13. AB-27 Modlara göre Yolcu Taşımacılığı Performansları.

Yıl	Karayolu	Demiryolu	Denizyolu	Havayolu
2020	89,3%	6,4%	0,2%	4,0%
2021	87,7%	6,5%	0,3%	5,5%

Model 1'de yer alan gelişmiş ülkelerin karayolu yük taşımacılığının modlar arasındaki oranı Tablo 14'te gösterilmiştir. Tüm gelişmiş ülkelerde yük taşımacılığında karayolu taşımacılığının yoğun olduğu görülmektedir.

Tablo 14. Model 1'deki Gelişmiş Ülkelerin Karayolu Yük Taşımacılığı Performansı.

Ülkeler	2020	2021
Belçika	77%	77%
Danimarka	86%	88%
Almanya	73%	72%
İrlanda	99%	99%
Fransa	85%	85%
Lüksemburg	85%	86%
Hollanda	50%	49%
Avusturya	61%	62%
Finlandiya	74%	73%
İsveç	70%	71%

Model 1’deki gelişmekte olan 15 ülkenin karayolu yük taşımacılığının modlara göre dağılımı Tablo 15’te gösterilmiştir. Letonya ve Litvanya hariç, tüm ülkelerdeki yük taşımacılığının ana modu karayoludur.

Tablo 15. Model 1’deki Gelişmekte Olan Ülkelerin Karayolu Yük Taşımacılığı Performansı.

Ülkeler	2020	2021
Bulgaristan	49%	55%
Çek Cumhuriyeti	75%	75%
Estonya	61%	60%
Yunanistan	97%	97%
İspanya	93%	93%
Hırvatistan	61%	62%
İtalya	84%	83%
Letonya	42%	46%
Litvanya	35%	37%
Macaristan	62%	66%
Polonya	71%	73%
Portekiz	84%	88%
Romanya	45%	49%
Slovenya	65%	66%
Slovakya	58%	55%

Gelişmiş ülkelerin karayolu yolcu taşımacılığının diğer modlar arasındaki oranı Tablo 16’da gösterilmiştir. Karayolu taşımacılığının, yolcu taşımacılığında tüm ülkelerdeki en yoğun mod olduğu görülmektedir.

Tablo 16. Model 1’deki Gelişmiş Ülkelerin Karayolu Yolcu Taşımacılığı Performansı.

Ülkeler	2020	2021
Belçika	92%	93%
Danimarka	94%	93%
Almanya	92%	92%
İrlanda	98%	98%
Fransa	91%	90%
Lüksemburg	96%	96%
Hollanda	92%	91%
Avusturya	83%	84%
Finlandiya	95%	95%
İsveç	91%	91%

Model 1’de yer alan gelişmekte olan ülkeler için karayolu yolcu taşımacılığının modlar arasındaki payı Tablo 17’de gösterilmiştir. Gelişmiş ülkelerde olduğu gibi gelişmekte olan ülkelerde de karayolu taşımacılığının yolcu taşımacılığında en büyük paya sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 17. Model 1’deki Gelişmekte Olan Ülkelerin Karayolu Yolcu Taşımacılığı Performansı.

Ülkeler	2020	2021
Bulgaristan	97%	97%
Çek Cumhuriyeti	88%	90%
Estonya	98%	98%
Yunanistan	98%	98%
İspanya	95%	93%
Hırvatistan	96%	97%
İtalya	95%	95%
Letonya	97%	97%
Litvanya	99%	99%
Macaristan	92%	92%
Polonya	94%	93%
Portekiz	97%	96%
Romanya	94%	95%
Slovenya	99%	98%
Slovakya	93%	93%

Çalışmanın ikinci modelinin birinci aşamasına bakıldığında; tüm göstergeler bazında, birinci gruptaki ülkelerin ortalama değerinin, ikinci gruptaki ülkelerin ortalama değerinden yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 18).

Tablo 18. Model 2'nin 1. Aşaması İçin Ülkelerin Ortalama ve Standart Sapma Değerleri.

Gelişmiş Ülkeler										
Yıl	İstihdam		Enerji Tüketimi		Yatırım (Milyar)		Yük Taşımacılığı		Yolcu Taşımacılığı	
	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS
2020	270.7	286.1	15.2	16.1	5.0	5.6	124.1	151.9	252.8	293.7
2021	274.0	294.1	16.0	17.0	5.0	5.4	129.5	156.8	264,4	305.6

Gelişmekte Olan Ülkeler										
Yıl	İstihdam		Enerji Tüketimi		Yatırım (Milyar)		Yük Taşımacılığı		Yolcu Taşımacılığı	
	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS
2020	270.7	286.1	15.2	16.1	5.0	5.6	124.1	151.9	252.8	293.7
2021	274.0	294.1	16.0	17.0	5.0	5.4	129.5	156.8	264,4	305.6

İkinci aşamada da tüm göstergeler için gelişmiş ülkelerin ortalama değerinin, gelişmekte olan ülkelerin ortalama değerinden yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 19).

Tablo 19. Model 2'nin 2. Aşaması İçin Ülkelerin Ortalama ve Standart Sapma Değerleri.

Gelişmiş Ülkeler										
Yıl	Yük Taşımacılığı		Yolcu Taşımacılığı		Sera Gazı Emisyonu		Ölüm Sayıları		Ciro	
	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS
2020	124.1	151.9	252.8	293.7	43.5	47.6	898.5	1007.5	94991.6	98357.1
2021	129.5	156.8	264.4	305.6	45.6	50.0	931.5	1059.7	112054.3	117590.4

Gelişmekte Olan Ülkeler										
Yıl	Yük Taşımacılığı		Yolcu Taşımacılığı		Sera Gazı Emisyonu		Ölüm Sayıları		Ciro	
	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS
2020	56.4	72.4	127.9	156.0	23.7	27.4	747.6	829.8	32981.8	42819.5
2021	62.0	79.7	134.7	166.3	26.9	32.2	805.8	879.9	38761.9	51148.6

AB-27 ülkelerindeki karayolu yük taşımacılığının modlar arasındaki oranı Tablo 20’de gösterilmiştir. Tüm ülkelerde yük taşımacılığında karayolu taşımacılığının yoğun olduğu görülmektedir. Letonya ve Litvanya hariç, tüm ülkelerdeki yük taşımacılığının ana modu tartışmasız karayoludur.

Tablo 20. Model 2’deki Ülkeler İçin Karayolu Yük Taşımacılığı Performansı.

Gelişmiş Ülkeler		
Ülkeler	2020	2021
Belçika	77%	77%
Almanya	73%	72%
İrlanda	99%	99%
Fransa	85%	85%
Hollanda	50%	49%
Avusturya	61%	62%
Finlandiya	74%	73%
İsveç	70%	71%
Gelişmekte Olan Ülkeler		
Ülkeler	2020	2021
Bulgaristan	49%	55%
Çekya	75%	75%
Estonya	61%	60%
Yunanistan	97%	97%
İspanya	93%	93%
Hırvatistan	61%	62%
İtalya	84%	83%
Letonya	42%	46%
Litvanya	35%	37%
Macaristan	62%	66%
Polonya	71%	73%
Slovenya	65%	66%

AB-27 ülkelerinde karayolu yolcu taşımacılığının diğer modlar arasındaki oranı Tablo 21’de gösterilmiştir. Karayolu taşımacılığının, yolcu taşımacılığında tüm ülkelerdeki en yoğun mod olduğu görülmektedir.

Tablo 21. Model 2’deki Ülkeler İçin Karayolu Yolcu Taşımacılığı Performansı.

Gelişmiş Ülkeler		
Ülkeler	2020	2021
Belçika	92%	93%
Almanya	92%	92%
İrlanda	98%	98%
Fransa	91%	90%
Hollanda	92%	91%
Avusturya	83%	84%
Finlandiya	95%	95%
İsveç	91%	91%
Gelişmekte Olan Ülkeler		
Ülkeler	2020	2021
Bulgaristan	97%	97%
Çekya	88%	90%
Estonya	98%	98%
Yunanistan	98%	98%
İspanya	95%	93%
Hırvatistan	96%	97%
İtalya	95%	95%
Letonya	97%	97%
Litvanya	99%	99%
Macaristan	92%	92%
Polonya	94%	93%
Slovenya	99%	98%

5.5.3. Ampirik Analiz ve Tartışmalar

Tezin birinci modeline ilişkin 2020-2021 yılları için gelişmiş ülkelerin Süper-SBM-VZA yaklaşımıyla hesaplanan çevre, enerji ve ekonomik verimlilik puanları Tablo 22’de verilmiştir. Gelişmiş ülkeler için Süper-SBM-VZA sonuçlarına göre, analiz edilen dönemde Danimarka’nın en verimli ülke olduğu, Almanya, Fransa ve Finlandiya’nın en az verimli ülkeler olduğu görülmüştür. Yukarıdaki tabloda görülebileceği gibi, ortalama verimlilik seviyesi 0,57 ile 0,62 arasında değişmekte bu sonuçlar karayolu taşımacılığı verimliliğinde iyileştirmeye ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Tablo 22. Model 1’deki Gelişmiş Ülkelere İlişkin Süper-SBM-VZA Tekniğiyle Çevresel, Enerji ve Ekonomik Verimlilik Sonuçları.

Ülkeler	2020	2021
Belçika	0,494	0,433
Danimarka	1,068	1,218
Almanya	0,405	0,381
İrlanda	0,472	0,480
Fransa	0,325	0,256
Lüksemburg	1,139	0,972
Hollanda	0,897	0,748
Avusturya	0,613	0,486
Finlandiya	0,296	0,254
İsveç	0,478	0,431
Ortalama	0,619	0,566

2020-2021 yıllarında gelişmekte olan ülkeler için Süper-SBM-VZA yaklaşımıyla hesaplanan çevresel, enerji ve ekonomik verimlilik puanları Tablo 23’te verilmiştir.

Tablo 23. Model 1’deki Gelişmekte Olan Ülkelere İlişkin Süper-SBM-VZA Tekniği ile Çevre, Enerji ve Ekonomik Verimlilik Sonuçları.

Ülkeler	2020	2021
Bulgaristan	0,424	0,418
Çek Cumhuriyeti	0,727	0,609
Estonya	1,262	1,037
Yunanistan	0,415	0,432
İspanya	0,802	0,842
Hırvatistan	0,497	0,431
İtalya	0,656	0,640
Letonya	0,720	0,803
Litvanya	1,160	1,182
Macaristan	0,538	0,476
Polonya	0,684	0,693
Portekiz	0,728	0,784
Romanya	0,507	0,491
Slovenya	0,582	0,582

Slovakya	0,862	0,844
Ortalama	0,704	0,684

Gelişmekte olan ülkeler için Süper-SBM-VZA sonuçlarına göre Estonya ve Litvanya, analiz döneminde en verimli ülkeler olarak belirlenmiştir. Ülkelerin ortalama verimlilik seviyesi 0,68 ile 0,70 arasında değişmektedir. Öte yandan; Bulgaristan, Yunanistan ve Hırvatistan'ın bu grupta yer alan en az verimli ülkeler olduğu görülmektedir.

Modelde ele alınan gerçek verilerle yapılan analiz sonucunun verimli hale getirilmesi için gerekli olan yüzdelik değişim değerleri SBM-VZA ile hesaplanmıştır (Tablo 24).

Tablo 28'de görülebileceği gibi gelişmiş ülkeler için ciro değişimi 2020 ve 2021 yıllarında %101 ve %128, gelişmekte olan ülkeler için ise aynı zaman dilimi için %61 ve %64 arasındadır. Dolayısıyla, ilk grupta yer alan ülkelerin üretken olabilmesi için gereken ciro artışının ikinci grupta yer alan ülkelerdeki ciro artışından fazla olduğu sonucuna varılabilir.

Tablo 24. Model 1'deki Ülkelere İlişkin Modelin Verimli Çıkabilmesi İçin Gereken Ortalama Yıllık Yüzdelik Değişim.

Yıl	Gelişmiş Ülkeler			Gelişmekte Olan Ülkeler		
	Yük Taşımacılığı	Yolcu Taşımacılığı	Ciro	Yük Taşımacılığı	Yolcu Taşımacılığı	Ciro
2020	-27%	-6%	101%	-21%	-5%	61%
2021	-26%	-6%	128%	-25%	-5%	64%

Model 2'nin 1. aşaması için gelişmiş ülkelerde Süper-SBM-VZA yaklaşımı ile hesaplanan çevresel, enerji ve ekonomik verimlilik skorları 2020-2021 yılları için Tablo 25'te verilmiştir.

Gelişmiş ülkeler için Süper-SBM VZA bulgularına dayanarak, Belçika'nın analiz edilen dönemde en etkin ülke olduğu söylenebilir. Buna ek olarak, Hollanda, Finlandiya ve İsveç en az etkin ülkeler olarak bulunmuştur. Ülkelerin ortalama etkinlik düzeyi 1,05 ile 1,17 arasında değişmektedir. Tabloda yer alan tüm ülkelerin etkinliklerinin analiz dönemi boyunca tutarlı olmadığı ve Avusturya başta olmak üzere bazı ülkelerde değişiklik gösterdiği izlenmektedir. Avusturya'nın verileri detaylı bir şekilde incelendiğinde 2020 ile 2021 yılları arasında girdi olarak modelde yer alan yatırım miktarının %12 azalırken, çıktı olarak modelde bulunan yük ve yolcu taşımacılığı değerlerinin sırasıyla %6 ve %5 arttığı görülmüştür.

Tablo 25. Model 2 1. Aşama, Gelişmiş Ülkeler İçin Süper-SBM-VZA Tekniği ile Çevresel, Enerji ve Ekonomik Verimlilik Sonuçları.

Ülkeler	2020	2021
Belçika	1,58	1,26
Almanya	1,11	1,10
İrlanda	1,07	1,12
Fransa	1,05	1,07
Hollanda	0,68	0,75
Avusturya	1,00	2,14
Finlandiya	1,02	0,98
İsveç	0,90	0,92
Ortalama	1,05	1,17

Model 2'nin 1. aşamasında gelişmekte olan ülkeler için Süper-SBM-VZA yaklaşımı ile hesaplanan çıktıların çevre, enerji ve ekonomik verimlilik skorları 2020-2021 yılları için Tablo 26'da verilmiştir. Gelişmekte olan ülkeler için süper SBM-VZA sonuçlarına göre, İtalya analiz edilen dönem boyunca sürekli olarak en etkin ülkedir. Yüksek etkinlik seviyesine sahip ülkeler İspanya ve Polonya'dır. Bulgaristan'ın 2021 yılında en iyi verimlilik skoruna sahip olduğu söylenebilir. 2021 yılında Bulgaristan'ın yollara yapılan resmi yatırım harcama değerlerinin bir önceki yıla göre oldukça düşük

kalması sebebiyle ilgili yılın verimlilik sonuçları yüksek çıkmıştır. Verimlilik seviyelerinin ortalama aralığı 0,91 ile 1,04 arasındadır. Ayrıca Litvanya, Estonya ve Hırvatistan bu gruptaki en az verimli ülkeler olarak görülmüştür.

Tablo 26. Model 2 1. Aşama, Gelişmekte Olan Ülkeler İçin Süper-SBM-VZA Tekniği ile Çevre, Enerji ve Ekonomik Verimlilik Sonuçları.

Ülkeler	2020	2021
Bulgaristan	0,69	2,23
Çekya	0,97	1,08
Estonya	0,70	0,72
Yunanistan	1,07	1,16
İspanya	1,14	1,16
Hırvatistan	0,69	0,70
İtalya	1,13	1,02
Letonya	0,90	0,86
Litvanya	0,69	0,73
Macaristan	0,96	0,92
Polonya	1,02	1,01
Slovenya	0,98	0,88
Ortalama	0,91	1,04

Gelişmiş ülkeler dikkate alındığında, aşama 2 için Süper-SBM-VZA yaklaşımı ile hesaplanan çevresel, enerji ve ekonomik etkinlik skorları 2020-2021 yılları için Tablo 27’de verilmiştir.

Tablo 27. Model 2 2. Aşama, Gelişmiş Ülkeler İçin Süper-SBM-VZA Tekniği ile Çevresel, Enerji ve Ekonomik Verimlilik Sonuçları.

Ülkeler	2020	2021
Belçika	0,57	0,58
Almanya	0,45	0,51
İrlanda	0,99	0,97
Fransa	0,45	0,43
Hollanda	1,68	1,78
Avusturya	0,68	0,65
Finlandiya	0,43	0,40
İsveç	0,53	0,58

Ortalama	0,72	0,74
----------	------	------

Model 2'nin 2. aşamasında, 1. aşamadaki çıktıların girdi olarak dahil edildiği durumda gelişmiş ülkeler için Süper-SBM VZA sonuçlarına göre Hollanda'nın analiz edilen dönemde en etkin ülke olduğu söylenebilir. Bunun yanı sıra, Fransa, Almanya ve Finlandiya en az etkin ülkeler olarak görülmektedir. Tablo 27'de görüldüğü üzere ortalama etkinlik düzeyi 0,72 - 0,74 arasında değişmektedir.

Gelişmekte olan ülkeler için Süper-SBM-VZA yaklaşımı ile hesaplanan çevre, enerji ve ekonomik verimlilik skorları 2020-2021 yılları için Tablo 28'de verilmiştir.

Tablo 28. Model 2 2. Aşama, Gelişmekte Olan Ülkeler İçin Süper-SBM-VZA Tekniği ile Çevre, Enerji ve Ekonomik Verimlilik Sonuçları.

Ülkeler	2020	2021
Bulgaristan	0,42	0,42
Çekya	0,73	0,61
Estonya	1,26	1,04
Yunanistan	0,42	0,43
İspanya	0,80	0,84
Hırvatistan	0,50	0,43
İtalya	0,66	0,64
Letonya	0,72	0,80
Litvanya	1,16	1,18
Macaristan	0,54	0,48
Polonya	0,68	0,69
Slovenya	0,58	0,58
Ortalama	0,71	0,68

Model 2'nin 2. aşamasında, 1. aşamadaki çıktıların girdi olarak dahil edildiği durumda, gelişmekte olan ülkeler için Süper-SBM VZA sonuçlarına göre, Estonya'nın analiz edilen dönemde en etkin ülke olduğu söylenebilir. Bunun yanı sıra Bulgaristan, Hırvatistan ve Yunanistan en az etkin ülkeler olarak tespit edilmiştir.

Yukarıdaki tabloda görüldüğü üzere, ortalama etkinlik seviyesi 0,68 - 0,71 arasında değişmektedir. Ayrıca, tüm ülkelerin etkinliğinin analiz dönemi boyunca tutarlı olmadığı ve başta Estonya olmak üzere bazı ülkelerde değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Model 2'nin her iki aşamasında dikkate alınan gerçek veriler ile yapılan analiz sonucunun verimli hale getirilmesi için gereken ortalama yüzde değişim değerleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir (Tablo 29-30).

Tablo 29. Model 2 1. Aşama, Ülkeler İçin Modelin Verimli Çıkabilmesi İçin Gereken Ortalama Yıllık Yüzde Değişikliği.

Gelişmiş Ülkeler					
Yıl	İstihdam	Enerji Tüketimi	Yatırım	Yük Taşımacılığı	Yolcu Taşımacılığı
2020	-14%	-5%	-15%	-4%	12%
2021	-13%	-12%	-14%	8%	13%
Gelişmekte Olan Ülkeler					
Yıl	İstihdam	Enerji Tüketimi	Yatırım	Yük Taşımacılığı	Yolcu Taşımacılığı
2020	-23%	-3%	-20%	29%	4%
2021	-20%	-8%	-14%	23%	18%

Tablo 29'da görüleceği üzere, 1. aşamada yük taşımacılığı yüzdesindeki değişim gelişmiş ülkeler için -%4 - %8, gelişmekte olan ülkeler için %23 ve %29 olduğu görülmekte, benzer şekilde, yolcu taşımacılığı yüzdesi gelişmiş ülkeler için %12 - %13 arasında, gelişmekte olan ülkeler için ise %4 - %18 arasında değişmektedir.

2. aşamada, Tablo 30'da görülebileceği gibi gelişmiş ülkeler için ciro değişimi %78, gelişmekte olan ülkeler için ise %64 - %68 arasındadır. Dolayısıyla, ilk grupta yer alan ülkelerin üretken olabilmesi için gereken ciro artışının ikinci grupta yer alan ülkelerdeki ciro artışından önemli ölçüde daha fazla olduğu sonucuna varılabilir.

Tablo 30. Model 2 2. Aşama, Ülkeler İçin Modelin Verimli Çıkabilmesi İçin Gereken Ortalama Yıllık Yüzde Değişikliği.

Gelişmiş Ülkeler			
Yıl	Yük Taşımacılığı	Yolcu Taşımacılığı	Ciro
2020	-3%	-14%	78%
2021	-8%	-13%	78%
Gelişmekte Olan Ülkeler			
Yıl	Yük Taşımacılığı	Yolcu Taşımacılığı	Ciro
2020	-24%	-4%	64%
2021	-26%	-3%	68%

SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerji, ulaştırma ve endüstri gibi ekonominin tüm sektörlerinin kendine özgü enerji kullanım modelleri ve kaynakları olması sebebiyle enerji tüketimi sektörler arasında önemli ölçüde farklılık göstermektedir.

Toplu olarak değerlendirildiğinde bu sektörler çoğu ekonomide toplam enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Sektörler arası enerji tüketim kalıplarını anlamak, politika yapıcılar ve enerji planlamacıları için enerji verimliliğı, tasarrufu ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla daha temiz enerji kaynaklarına geçiş için etkili stratejiler geliştirmeleri açısından büyük önem arz etmektedir.

Enerji tüketimi nedeniyle oluşan karbondioksit, metan ve nitroz oksit dahil olmak üzere sera gazı (GHG) emisyonları, benzersiz enerji tüketimi kaynakları ve faaliyetleri nedeniyle ekonominin farklı sektörleri arasında farklılık göstermektedir.

Sektöre özgü sera gazı emisyonlarını anlamak, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, enerji verimliliğinin artırılması, düşük karbonlu ulaşım seçeneklerinin (örneğin elektrikli araçlar) teşvik edilmesi, karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin uygulanması ve sürdürülebilirliğin benimsenmesi gibi etkili azaltım stratejilerinin geliştirilmesi için hayati önem taşımaktadır. Hükümetler, endüstriler ve bireyler iklim değişikliğıyle mücadele etmek ve çevresel sürdürülebilirliğı teşvik etmek için bu sektörlerdeki emisyonların azaltılmasında kilit rol oynamaktadır.

Sera gazı emisyon salınımında çok büyük bir role sahip olan ulaştırma sektöründen kaynaklanan sera gazı (GHG) emisyonlarının azaltılması, iklim değişikliğıyle mücadele ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için çok önemlidir.

Diğer yandan trafik güvenliğine ilişkin olarak 2015 yılında küresel çapta sürdürülebilir kalkınma için; 2030 yılına kadar “yoksulluğun sona erdirilmesi, eşitsizlik ve adaletsizlikle mücadele ve iklim değişikliğinin sona erdirilmesi” amaçları doğrultusunda Birleşmiş Milletler 17 Küresel Amaç belirlemiştir. Bunlardan “Sağlıklı ve Nitelikli Yaşam” adlı 3 numaralı küresel amacın alt hedeflerinden olan “3.6 - 2020’ye kadar karayolları trafik kazalarından kaynaklanan küresel ölümlerin ve yaralanmaların sayısının yarıya indirilmesi” konusunda ülkelerin hedefe yaklaşma seviyelerinin beklenenden oldukça uzak olduğu söylenebilmektedir (UN, 2024).

Bu kapsamda ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü sorumluluğundaki yol ağında 2003-2023 yılları arasında taşıt hareketliliği 52,3 milyar taşıt-km’den 154,5 milyar taşıt-km’ye yükselmesine rağmen aynı dönemde 100 milyon taşıt-km’ye düşen can kaybı 5,72’den 1,29 seviyesine gerilemiştir.

Bu çalışmada 2 model için analiz yapılmıştır. İlk modelde 25 AB ülkesindeki karayolu taşımacılığı sektörünün çevre, enerji ve ekonomik verimliliği Süper-SBM-VZA yaklaşımıyla incelenmiştir. 25 ülke iki kategoriye ayrılmıştır;

- i. Kişi başına düşen GSYH' si AB-27 ortalamasının üzerinde olan 10 ülke (gelişmiş)
- ii. Kişi başına düşen GSYH' si AB-27 ortalamasının altında olan 15 ülke (gelişmekte olan).

Yük ve yolcu taşımacılığı girdi, şirketlerin enerji tüketimi, sera gazı emisyonları ve cirosu çıktı olarak alınmıştır. Enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları istenmeyen çıktılar olarak sınıflandırılarak analiz edilmiştir.

Gelişmiş ülkeler için Süper-SBM-VZA analizine göre, Danimarka analiz edilen dönemde en verimli ülke olarak öne çıkarken Almanya, Fransa ve Finlandiya en az verimli olarak belirlenmiştir. Ortalama verimlilik seviyelerinin 0,57 - 0,62 arasında değiştiği ve karayolu taşımacılığı verimliliğinde iyileştirme için alan olduğunu görülmektedir. Listelenen tüm ülkelerin verimliliğinin incelenen dönem boyunca dalgalandığı, özellikle İrlanda'da yıldan yıla önemli değişiklikler olduğu belirlenmiştir.

Danimarka, iş yapılabilirliği açısından yüksek sıralaması nedeniyle dış ticaretle uyumlu bir ülke olarak kabul edilmektedir. İthal hammaddeler ve dış ticaret bağımlılığı nedeniyle yüksek ciro seviyeleri ile ulaşım hareketliliğinde verimli hale geldiği görülmektedir.

Gelişmekte olan ülkeler için Süper-SBM-VZA ile yapılan analiz, Estonya'nın analiz edilen dönemde en verimli ülke olduğunu göstermektedir. Her yıl ortalamanın üzerinde verimlilik seviyelerine sahip sadece iki ülkeden biridir. Letonya, 2020 ve 2021 yıllarında ikinci en yüksek verimlilik puanlarıyla yakından takip etmektedir. Bu grup için ortalama verimlilik seviyeleri 0,68 - 0,70 arasında değişmektedir. Ancak, Bulgaristan, Yunanistan ve Hırvatistan bu kategorideki en az verimli ülkelerdir. İlk gruptan farklı olarak, ikinci gruptaki ülkelerin verimlilik seviyeleri analiz edilen yıllar boyunca tutarlı görünmektedir.

İkinci grupta Estonya, Letonya ve Litvanya'nın daha yüksek verimliliğinin, Avrupa'daki ana ulaşım ağlarına nispeten daha uzak olmaları ve yük taşımacılığındaki paylarının düşük olmasından kaynaklandığı ve bu bağlamda düşük enerji tüketimi ve emisyon değerlerine sahip oldukları düşünülmektedir.

Bulgaristan'ın diğer ülkelere kıyasla düşük verimliliğinin nedeni, ulaşım hareketliliğine göre düşük ciroya sahip olmasından kaynakladığı, düşük cironun ise düşük katma değerli ürünlerin taşınması sonucunda oluştuğu değerlendirilmektedir.

İkinci model ise iki aşamalı olarak çalışılmıştır. Süper-SBM-VZA yaklaşımını kullanarak 20 AB ülkesinde karayolu taşımacılığı sektörünün çevre, enerji ve ekonomik performansını değerlendirmektedir. Seçilen ülkeler iki kategoriye ayrılmıştır:

- i. Kişi başına düşen GSYH' si AB-27 ortalamasının üzerinde olan 8 ülke (gelişmiş)
- ii. Kişi başına düşen GSYH' si AB-27 ortalamasının altında olan 12 ülke (gelişmekte olan)

İki aşamada gerçekleştirilen değerlendirmenin ilk aşamasında karayolu taşımacılığının enerji verimliliğini incelerken ikinci aşama sürdürülebilir karayolu taşımacılığının verimliliğine odaklanılmıştır.

Aşama 1'de toplam enerji tüketimi, yatırım ve istihdam girdi olarak, yük ve yolcu taşımacılığı ise çıktı olarak alınmıştır. Gelişmiş ülkeler için yapılan Süper-SBM-VZA analizine göre, Belçika incelenen dönem boyunca en verimli ülke olarak öne çıkmaktadır.

Belçika için 2016 yılından sonra etkinlik oranında artış olduğu, yatırımların faydalarının ilerleyen yıllarda görüldüğü bilinmektedir. Bu şartlar altında daha az yatırımla daha yüksek istihdam oranlarına ulaşıldığı, enerji tüketiminin sabit kaldığı ve karayolu taşımacılığı hareketliliğinin arttığı şeklinde yorumlanmaktadır.

Öte yandan Hollanda, Finlandiya ve İsveç gruptaki en az verimli ülkeler olmalarına rağmen puanları yüksektir; bu da bu üç ülkenin aslında karayolu taşımacılığında verimli olduklarını ancak gruptaki diğer ülkelerin gerisinde kaldıklarını, karayolu taşımacılığı verimliliğinin iyi olduğunu ve ortalama verimlilik seviyelerinin 1,05 - 1,17 arasında değiştiğini göstermektedir. Listelenen ülkelerin üçünde verimlilik analiz dönemlerinde dalgalanma göstermiş ve özellikle İrlanda'da farklılıklar görülmüştür.

Gelişmekte olan ülkeler için yapılan Süper-SBM-VZA analizi, İspanya'nın analiz edilen dönem boyunca en verimli ülke olduğunu göstermektedir. İspanya, her iki yıl boyunca ortalamanın üzerinde verimlilik seviyesine sahip sadece dört ülkeden biridir. İtalya, 2020 - 2021 yılları arasında en yüksek ikinci verimlilik skorlarıyla hemen arkasından gelmektedir. İtalya ve İspanya'nın verimlilik seviyeleri analiz yılları boyunca tutarlıdır. Bu grup için ortalama verimlilik seviyeleri 0,91 - 1,04 arasında değişmektedir. Ülkeler arasında Bulgaristan, analiz yılları arasında en tutarsız skorlara sahiptir. Bulgaristan 2021 yıllarında en yüksek verimlilik puanına sahipken, 2020 yılında puanı oldukça düşük kalmıştır. Bulgaristan'ın karayolu yatırımlarındaki dalgalanmaların verimlilik puanı üzerinde önemli bir etkisi olmuştur.

Estonya, Hırvatistan ve Litvanya bu kategorideki en az etkin ülkelerdir. İlk gruba benzer şekilde, ikinci gruptaki bazı ülkelerin incelenen yıllar boyunca istikrarlı verimlilik seviyelerine sahip olmadığı ve skorlarda dalgalanmalar olduğu görülmektedir.

Karayolunda yük ve yolcu taşımacılığının istihdam oranındaki artıştan doğrudan olumlu etkilendiği görülmektedir.

Model 2'nin 2. aşamasında, 1. aşama çıktıları olan yük ve yolcu taşımacılığı girdi olarak, sera gazı emisyonları, ölü sayısı ve şirketlerin ciro verileri ise çıktı olarak analiz edilmiştir. İkinci aşamada belirtilen ilk iki çıktı istenmeyen çıktılar olarak kategorize edilmiştir. Bu aşama ile ülkelerin taşımacılığında karayolu sektörünün sürdürülebilirlik verimliliği incelenmiştir.

Gelişmiş ülkeler için yapılan Süper-SBM-VZA analizine göre, Hollanda analiz edilen gruptaki en verimli ülke olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık, Almanya ve Fransa en az verimli ülkeler olarak sıralanmaktadır. Bu ülkelerin en az verimli ülkeler olmasında, karayolunda yüksek düzeyde yük ve yolcu taşımacılığı, buna bağlı sera gazı emisyonları ve karayolunda meydana gelen kazalar nedeniyle oluşan ölüm sayılarının nispeten yüksek olması etkili olmuştur. Ortalama verimlilik seviyelerinin 0,72 ve 0,74 arasında değiştiği ve karayolu taşımacılığı verimliliğinin iyileştirilmesi gerektiği görülmektedir. Listelenen ülkelerin etkinlik skorları analiz dönemi boyunca önemli ölçüde değişkenlik göstermemiştir.

Gelişmekte olan ülkeler için yapılan Süper-SBM-VZA analizi, Estonya'nın analiz edilen dönem boyunca en verimli ülke olduğunu göstermektedir. Estonya ve Litvanya her iki yıl ortalamasının üzerinde verimlilik seviyelerine sahiptir. Bu grup için ortalama verimlilik seviyeleri 0,68 - 0,71 arasında değişmekte ve bu sonuçlar da karayolu taşımacılığı verimliliğinde ilerleme kaydedilmesi gerektiğini göstermektedir. Bulgaristan, Yunanistan ve Hırvatistan bu kategorideki en az verimli ülkelerdir.

Literatürde, karayolu taşımacılığı verimliliği, bu araştırmadaki girdi ve çıktılarına benzer değişkenler kullanılarak çeşitli tekniklerle araştırılmıştır. Bu çalışmalar, Çin eyaletlerinin karşılaştırmasından OECD ülkelerinin karşılaştırmasına kadar farklı analiz yılları ve farklı coğrafi bölge ölçekleri için yürütülmüştür.

Gökgöz ve Yalçın (2024), AB ulaştırma sektörünün performansı ve verimliliği üzerine analizler yapmışlardır. Çalışmamızla uyumlu olarak, Avrupa Birliği ülkeleri, bu araştırmada kişi başına düşen GSYH rakamlarına göre gelişmiş veya gelişmekte olan olarak kategorize edilmiştir. PIV, ROV, MOORA ve MPI tekniklerini gerçekleştirmek için beş değişken GHG, istihdam, katma değer, toplam ulaştırma yatırımı ve toplam ulaştırma ölümleri kullanmışlardır. Bu analizin sonuçlarını, kendilerinin geliştirdiği MCDM modeliyle ağırlıklandırarak yorumlamışlardır. MCDM analizi, daha yüksek gelire sahip ülkelerin AB'deki muadillerinden önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir. Özellikle ulaştırma sektörüne önemli kaynaklar ayıran ülkelerin, daha yüksek enerji tüketimlerine rağmen daha büyük başarı elde ettiği belirtilmektedir.

Ayrıca, Gökgöz ve Yalçın (2022) 2014-2018 yılları arasında Avrupa Birliği ülkelerindeki enerji piyasalarının çevresel, enerji ve ekonomik verimliliği üzerine başka analizler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmamıza benzer şekilde, bu çalışmada da AB ülkeleri kişi başına düşen GSYİH verilerine göre gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler olarak gruplandırılmıştır. Bootstrap-DEA sonuçlarına göre, gelişmekte olan ülkelerin genel enerji piyasası verimlilik puanlarının ortalamasının gelişmiş ülkelerin ortalamasından yüksek olduğu bulunmuştur.

Özetle, gelişmiş VZA yöntemleri enerji ve çevre uygulamalarının verimliliğini değerlendirmek için önemli araçlar olarak hizmet etmektedir. Bu araştırmanın sonuçları, karar vericiler ve yetkililerin AB'nin geleceğe yönelik genel hedeflerini belirlemede yaptıkları seçimleri önemli ölçüde etkileyebileceği değerlendirilmektedir.

Bu kapsamda, elektrikli ve hibrit ve yakıt tasarruflu araçlar gibi düşük emisyonlu taşıtların benimsenmesinin teşvik edilmesi için hükümetler elektrikli araçları

daha uygun fiyatlı hale getirmek için indirimler, vergi kredileri ve sübvansiyonlar gibi teşvikler sunabilir, şarj altyapısının artırılması ve ileri araç teknolojilerine yönelik araştırma ve geliştirmeye yatırım yapılmasına destekte bulunabilir.

Karbon vergileri, yenilenebilir enerji sistemleri için vergi indirimleri ve ulaşımda biyoyakıtların kullanılmasına yönelik teşvikler, çevresel performansı artırmak için tasarlanmıştır. Bu stratejiler, daha az verimli ülkelerin sürdürülebilirlik çabalarını iyileştirmelerine yardımcı olabilir. AB Ülkeleri, kaynaklar ve enerji açısından verimli iş uygulamalarını teşvik ederek eko-inovasyonu artırabilir. Akıllı şebeke teknolojisi, enerji depolama ve düşük karbonlu ulaşım gibi alanlarda araştırma ve geliştirmenin genişletilmesine vurgu yapılmalıdır. Eko-inovasyonu desteklemek teknolojiye ilerlemeyi sağlamaya yardımcı olabilir.

Toplu taşımayı cazip kılan, yaya dostu altyapı ve bisiklet yolları ile entegre ulaşım planlaması, bireysel araçlara olan bağımlılığı ve emisyonları azaltabilir.

Uzun mesafeli rutin seyahat ihtiyacını azaltan ve toplu taşıma odaklı gelişmeyi destekleyen kompakt ve karma kullanımlı ulaşım modelleri teşvik edilerek seyahat mesafeleri asgari seviyelere indirilecek şekilde tasarlanabilir.

Otomobiller, kamyonlar ve ticari filolar da dahil olmak üzere araçlar için sıkı yakıt verimliliği standartları belirlenerek uygulanması durumunda biyoyakıtlar ve doğal gaz gibi daha temiz yakıtların kullanımı yaygınlaştırılabilir. Düzenlemeler ile inovasyon teşvik edilerek ulaştırma sektöründe daha temiz teknolojilerin benimsenmesi ve yaygınlaşması hızlandırılabilir.

Hidrojen yakıt hücreleri, biyoyakıtlar ve yenilenebilir doğal gaz gibi alternatif yakıtların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması desteklenebilir. Düşük karbonlu ulaşım

seçeneklerine geçişi kolaylaştırmak için şarj istasyonları, hidrojen yakıt ikmal istasyonları ve biyoyakıt dağıtım ağılarına yönelik altyapı genişletilebilir.

Yoğun saatlerdeki trafiğı ve kat edilen toplam araç kilometresini azaltmak için sıkışıklık fiyatlandırması, araç paylaşımı teşvikleri ve esnek çalışma düzenlemeleri gibi talep yönetimi stratejileri uygulamaya konulabilir ve etkin trafik yönetimi ve akıllı ulaşım sistemleri mevcut altyapıyı optimize ederek emisyonları azaltabilir.

Uzun mesafeli taşımacılık için demiryolu ve deniz taşımacılığı gibi daha temiz yük taşıma modlarının kullanılmasıyla intermodal yük taşımacılığının teşvik edilmesi ve yük sektöründe düşük emisyonlu teknolojilerin benimsenmesiyle lojistik verimlilik artırılabilir.

Yakıt verimliliğini optimize etmek ve emisyonları azaltmak için sürücüler ekosürüş teknikleri konusunda bilinçlendirilerek bireysel araç kullanımının çevresel etkisini azaltmak için taşıt paylaşımı gibi çevre dostu davranışları teşvik edilebilir.

Otonom araçlar, elektrikli havacılık ve sürdürülebilir kentsel mobilite çözümleri dahil olmak üzere yenilikçi ulaşım teknolojilerinin araştırılmasına ve geliştirilmesine yönelik yatırımlar yapılarak düşük karbonlu ulaşım yeniliklerinin yaygınlaştırılması hızlandırılabilir.

Politika yapıcılar, sektör paydaşları ve topluluklar, bu önerileri koordineli ve kapsamlı bir şekilde uygulayarak ulaşım sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltırken hareketliliğı, hava kalitesini ve genel sürdürülebilirliğı de geliştirebilirler.

Sonuç olarak; karar modellerinin ve analizlerinin, Avrupa Birliğı ülkelerinin karayolu sektöründe uygulanabilir olduğı değıerlendirilmektedir.



KAYNAKÇA

Abbasi, T., & Abbasi, S. (2010). Renewable energy sources: Their impact on global warming and pollution. PHI Learning.

Abolhosseini, S., Heshmati, A., Altmann, J. (2014). A Review of Renewable Energy Supply and Energy Efficiency Technologies. IZA Discussion Paper No. 8145.

Ambika, Jadhav, S. K., Agrawal, S. et al. (2022). Energy Crises, Challenges and Solutions. İçinde P. Singh, S. Singh, G. Kumar, & P. Baweja (Ed.), Wiley Blackwell.

Andersen, P., & Petersen, N. C. (1993). A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. *Management Science*, 39(10), 1261–1264.

Arı, F., Yılmaz, V., (2023). “Türkiye’de ve Dünyada Enerji Kaynaklarının Genel Görünümü ve Alternatif Enerji Kaynaklarının Önemi”, Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, S.34, s.507-509.

Asif M, Muneer T. (2007). Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies. *Renew Sustain Energy Rev* 2007;11:1388–413.

Australian Renewable Energy Agency (AREA). “What is Renewable Energy?”. <http://arena.gov.au/about-renewable-energy>, (Erişim tarihi: 21/09/2021).

Bai D, Dong Q, Khan SAR, Chen Y, Wang D, Yang L. (2022). Spatial analysis of logistics ecological efficiency and its influencing factors in China: based on Super-SBM-undesirable and spatial Dubin models. *Environ Sci Pollut Res*, 2022;29(7):10138-10156.

Bayar, A. B. and Bahrend. H., (1994). Küresel Çevre Problemleri, Özkan matbaası, Ankara.

Boame AK (2004). The technical efficiency of Canadian urban transit systems. *Transportation Research, Part E*, 40(5):401–416.

BP (2018). Statistical Review of World Energy. <http://www.bp.com> (Erişim Tarihi: 06/09/2021)

BP. (2022). BP Statistical Review of World Energy. <https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bpstats-review-2022-full-report.pdf>

Bruckner T et al (2014). Energy systems. Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

Chang YT., Zhang N., Danao D. and Zhang N. (2013). Environmental efficiency analysis of transportation system in China: A non-radial VZA approach. *Energy Policy*, 2013;58:277-283. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.03.011.

Chang, T. P., & Hu, J. L. (2010). Total-factor energy productivity growth, technical progress, and efficiency change: An empirical study of China. *Applied Energy*, 87(10), 3262–3270.

Chen F, Zhao T, Wang J. (2019). The evaluation of energy–environmental efficiency of China's industrial sector: based on Super-SBM model. *Clean Technol Environ Policy*, 2019;21(7):1397-1414. doi:10.1007/s10098-019-01713-0

Chester L. (2010). Conceptualizing energy security and making explicit its polysomic nature. *Energy Policy* 2010;33:887–95.

Chien T, Hu J. (2007). Renewable energy and macroeconomic efficiency of OECD and non- OECD economies. *Energy Policy* 2007;35:3606–15.

Chung YH, Färe R, Grosskopf S. (1997). Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach. *J Environ Manag* 1997;51:229–40.

Clarke LE et al (2014). Chapter 6—assessing transformation pathways. *Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*

Cooper, W.W., Seiford, L.M., Tone, K. (2006). *Introduction to Data Envelopment Analysis and Its Uses*. Springer: Michigan.

Cui Q. and Li Y. (2014). The evaluation of transportation energy efficiency: An application of three-stage virtual frontier VZA. *Transportation Research Part D*, 2014;29:1-11. DOI: 10.1016/j.trd.2014.03.007.

Cullinane, K., Wang, T., Song, D., & Ji, P. (2006). The technical efficiency of container ports: Comparing data envelopment analysis and stochastic frontier analysis. *Transportation Research Part A*, 40, 354–374.

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2023).

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2023).

Deloitte, Establishing the Investment Case: Wind Power, (2014). URL, <http://tinyurl.com/deloitte-wind-investment-2014>.

Demir, A. (2009). Küresel İklim Değişikliğinin Biyolojik Çeşitlilik ve Ekosistem Kaynakları Üzerine Etkisi, Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, Cilt 1, Sayı 2, Sayfa 37- 54.

Devlet Su İşleri (2014). <http://www.dsi.gov.tr/docs/stratejik-plan/dsi-2014-faaliyet-raporu.pdf?sfvrsn=2>,).

DiPippo, R. (2016). Geothermal Energy: An Overview.

Duffie, J.A., Beckman W.A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition.

Ebinger J, Vergara W (2011). Climate impacts on energy systems: key issues for energy sector adaptation. World Bank.

Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., ... von Stechow, C. (2011). Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge : Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781139151153>.

Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü. “Yenilenebilir Enerji Kaynaklar”.. <https://eusolar.ege.edu.tr/tr-3482/yenilenebilir-enerji-kaynaklari.html> (Erişim tarihi: 11/09/2021)

European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport, (2023). EU transport in figures : statistical pocketbook 2023, Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2832/319371>

European Comission (2023). State of the Energy Union Report.

European Commission. (2021). Proposal for a Directive of The European Parliament and Of The Council: amending Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council, Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652.

European Commission: Questions and Answers - Making our energy system fit for our climate targets. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/QANDA_21_3544 (Erişim tarihi: 11/10/2021)

European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport. (2018). EU transport in figures : statistical pocketbook 2018. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2832/05477>.

European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport. (2019). EU transport in figures : statistical pocketbook 2019. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2832/017172>.

European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport. (2020). EU transport in figures : statistical pocketbook 2020. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2832/491038>.

European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport. (2021). EU transport in figures : statistical pocketbook 2021. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2832/27610>.

European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport. (2022). EU transport in figures : statistical pocketbook 2022. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2832/216553>.

European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport. (2023). EU transport in figures : statistical pocketbook 2023. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2832/319371>.

European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport. (2024). EU transport in figures: statistical pocketbook 2024. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2832/319371>.

European Council. (2007). Presidency conclusions: Brussels European council 8–9 march, 7224/1/07 REV 1. Brussels:European Council.

Fanchon, P. (2003). “Variable Selection For Dynamic Measures of Efficiency in the Computer Industry”, IAER, Vol. 9, No. 3, pp. 175-188.

Färe R, Grosskopf S, Norris M, Zhang Z. (1994). Productivity growth, technical progress and efficiency change in industrialized countries. *Am Econ Rev* 1994;84(1):66–83.

Fermann G. (2014). What is strategic about energy? De-simplifying energy security. In: Moe E, Midford P, editors. *The Political Economy of Renewable Energy and Energy Security, Common Challenges and National Responses in Japan, China and Northern Europe*. London: Palgrave MacMillan; 2014. p. 21–45.

Field CB et al (2014). Technical summary. *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary*

Ghosh, T. K., & Prelas, M. A. (2009). *Energy resources and systems*. İçinde Springer (C. 1). <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2383-4>

Gong, B., & Sickles, R. C. (1992). Finite sample evidence on the performance of stochastic frontiers and data envelopment analysis using panel data. *Journal of Econometrics*, 51, 259–284.

Gore, A. (2012). When will fossil fuels run out? - Ecotricity. <https://www.ecotricity.co.uk/our-green-energy/energyindependence/the-end-of-fossil-fuels>

Goswami, D.Y., Kreith, F., (2016). *Energy Efficiency and Renewable Energy Handbook*. CRC Press, NW.

Gökdemir, M., Kömürcü, M., Evcimen, T. (2012). Türkiye’de Hidroelektrik Enerji ve HES Uygulamalarına Genel Bakış. *TMH Dergisi*, sayı 471, s. 18-26.

Gökgöz, F., Erkul, E. (2019). Investigating the energy efficiencies of European countries with süper efficiency model and süper SBM approaches. *Energy Efficiency* 12:601–618 <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9652-6>

Gökgöz, F., Güvercin, M.T. (2018). Energy security and renewable energy efficiency in EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96:226-239.

Gökgöz, F., Güvercin, M.T. (2018). Investigating the total factor productivity changes in the top ICT companies worldwide. *Electron Commer Res* (2018) 18:791–811. <https://doi.org/10.1007/s10660-017-9285-4>

Görgülü, Y.F. (2022). “Enerji Krizi ve Yenilenemez Enerji Kaynakları”, *Teknobilim-2022: Enerji Krizi ve Yenilenebilir Enerji* (Ed. Ceren Karaman), Efe Akademik Yayıncılık, 2022, s. 11-15.

Gulliver, J.S., Goodman, E.D. (2014). *Hydropower Engineering Handbook*, 2nd Edition.

Hák, T., Janoušková, S., & Moldan, B. (2016). Sustainable development goals: A need for relevant indicators.

Halkos, G. E., & Tzeremes, N. G. (2007). International competitiveness in the ICT industry: Evaluating the performance of the top 50 companies. *Global Economic Review*, 36(2), 167–182.

Harris, J., Diamond, R., Iyer, M., Payne, C., Blumstein, C., & Siderius, H. P. (2008). Towards a sustainable energy balance: Progressive efficiency and the return of energy conservation. *Energy Efficiency*, 1, 175–188.

Honma, S., Hu, J.L. (2011). Industry-level total-factor energy efficiency in developed countries. *Kyushu Sangyo University, Discussion Paper*:51.

Hu, J. L., & Wang, S. C. (2006). Total-factor energy efficiency of regions in China. *Energy Policy*, 34(17), 3206–3217.

Hussain Z., Xia Z. and Li Y. (2022). Estimating sustainable transport efficiency and socioeconomic factors: Application of nonparametric approach. *Transportation Letters*, 2023;15(7):685-697. DOI: 10.1080/19427867.2022.2082004.

IEA (International Energy Agency) (2014). Energy Supply Security-Emergency Response of IEA Countries, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ENERGYSUPPLYSECURITY2014.pdf> (Erişim tarihi: 11/11/2021).

IEA (International Energy Agency). World Energy Outlook, Washington. 2017.

International Energy Agency: Energy Efficiency 2021. <https://www.iea.org> (Erişim tarihi: 17/11/2021).

İnan, İ., Akbulut, İ., Aslan, E., “Enerji Sorununun Çözümünde Yenilenemez ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yeri ve Önemi”, *Türk Dünyası Araştırmaları*, C.120, S.237, s.14-21.

Kaleibar MM. and Krmac E. (2024). A Novel Data Envelopment Analysis Framework for Performance Evaluation of European Road Transport Systems. *Promet – Traffic & Transportation*, 2024;36(1):24-41.

Kanat, Z., Keskin, A., (2018). Dünyada İklim Değişikliği Üzerine Yapılan Çalışmalar ve Türkiye'de Mevcut Durum, *Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Derg.*, 49 (1): 67-78.

Kapçak, S., (2022). Seçilmiş Yüksek-Orta Gelirli Ülkelerde Yenilenebilir Enerji ve Yenilenemeyen Enerji Tüketiminin Ekonomik Büyüme Üzerindeki Etkisi: Bir Saklı Eşbütünleşme Yaklaşımı, *Doktora Tezi*, 2022, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, s. 38-45.

Karagöl, E.T., Kavaz, İ., (2017). Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji. SETA İstanbul: Turkuvaz Haberleşme ve Yayıncılık A.ř.

Karakaya, E., Sofuoğlu, E., (2015). İklim Değişikliği Müzakerelerine Bir Bakış: 2015 Paris İklim Zirvesi. *International Symposium on Eurasia Energy Issues* 28-30 May 2015, İzmir, Turkey.

Karlaftis MG (2004). A VZA approach for evaluating the efficiency and effectiveness of urban transit systems. *Eur J Oper Res*, 152(2):354–364.

Kaya, K., şenel, M. C., & Koç, E. (2018). DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE YENİLENEBİLLR ENERJİ KAYNAKLARININ DEğERLENDİRİLMESİ. *Technological Applied Sciences*, 13(3), 219-234.

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

Koç, E., Kaya, K. (2015). Enerji Kaynakları–Yenilenebilir Enerji Durumu, Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 668, s. 36-47.

Koç, E., Şenel, M. C. (2013). “Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu–Genel Değerlendirme,” Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 54, sayı 639, s. 32-44.

Li H. ve Shi JF. (2014). Energy efficiency analysis on Chienese industrial sectors: An improved Super-SBM model with undesirable outputs. *Journal of Cleaner Production*, 2014;65:97-107. doi:10.1016/j.jclepro.2013.09.035

Li T., Cao X. ve Yang W. (2016). Measuring the efficiency of regional integrated transport in China: A Data Envelopment Analysis. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 2016;44(1):23-34. DOI: 10.3311/PPtr.7529.

Li T., Yang W., Zhang H. ve Cao X. (2016). Evaluating the impact of transport investment on the efficiency of regional integrated transport systems in China. *Transport Policy*, 2016;45:66-76. DOI: 10.1016/j.tranpol.2015.09.005.

Lu, Y., Nakicenovic, N., Visbeck, M., & Stevance, A.-S. (2015). Policy: Five priorities for the UN sustainable development goals. *Nature*, 520, 432–433. <http://dx.doi.org/10.1038/520432a>

Makine Mühendisleri Odası (MMO). “Yenilenebilir Enerji Kaynakları”, http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/9514e888b8f2aca_ek.pdf Erişim Tarihi: (08/08/2021)

Margari BB., Erbetta F., Petraglia C. et al (2007). Regulatory and environmental effects on public transit efficiency: a mixed VZA-SFA approach. *J Regul Econ* 32, 131–151.

M. Howells, S. Hermann, M. Welsch, M. Bazilian, R. Segerström, T. Alfstad, D. Gielen, H. Rogner, G. Fischer, H. Velthuisen, D. Wiberg, C. Young, A. Roehrl, A. Mueller, P. Teduto, I. Ramma, Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies, *Nat. Clim. Change* 3 (July) (2013) 622–626.

Menegaki AN. (2013) .Growth and renewable energy in Europe: benchmarking with data envelopment analysis. *Renew Energy* 2013;60:363–9.

OECD Data Explorer (2024). Transport Infrastructure and Maintenance Investments. Retrieved from: [https://data-explorer.oecd.org/vis?_ga=2.34164321.1309224220.1731393235-1288489897.1724656400&fs\[0\]=Topic%2C0%7CTransport%23TRA%23&fs\[1\]=Topic%2C1%7CTransport%23TRA%23%7CInfrastructure%20investment%20and%20maintenance%20spending%23TRA_IMS%23&pg=0&fc=Topic&snb=1&vw=tb&df\[ds\]=dsDisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_INFRINV%40DF_INFRINV&df\[ag\]=OECD.ITF&](https://data-explorer.oecd.org/vis?_ga=2.34164321.1309224220.1731393235-1288489897.1724656400&fs[0]=Topic%2C0%7CTransport%23TRA%23&fs[1]=Topic%2C1%7CTransport%23TRA%23%7CInfrastructure%20investment%20and%20maintenance%20spending%23TRA_IMS%23&pg=0&fc=Topic&snb=1&vw=tb&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_INFRINV%40DF_INFRINV&df[ag]=OECD.ITF&)

[df\[vs\]=1.0&dq=.A.INV.EUR..V&lom=LASTNPERIODS&lo=7&to\[TIME PERIOD\]=false](#) (Erişim tarihi: 10/11/2024).

Owusu, P. A., Asumadu-Sarkodie, S., & Ameyo, P. (2016). A review of Ghana's water resource management and the future prospect. *Cogent Engineering*, 3. doi:10.1080/23311 916.2016.1164275

Öymen, G., Ömeroğlu M. (2020). İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi Yıl:19 Sayı:39 s.1069-1087, 2020. DOI: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/iticusbe/issue/58524/769022> .

Özbektaş, S., Şenel, M.C., Sungur, B. (2023). "Dünyada ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Durumu ve Kurulum Maliyetleri", *Mühendis ve Makina*, C.64, S.711, s.321-324.

Ramanatha R. (2000). A holistic approach to compare energy efficiencies of different transport modes. *Energy Policy*, 2000;28:743-747. DOI: 10.1016/S0301-4215(00)00072-0.

Sampaio BR., Neto OL. and Sampaio Y. (2008). Efficiency analysis of public transport systems: lessons for institutional planning. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(3):445–454.

Saxena P. and Saxena RR. (2011). Measuring efficiencies in Indian public road transit: a data envelopment analysis approach. *Opsearch*, 47(3):195–204.

Seiford, L.M., Zhu, J. (2011). *Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations*.

https://www.researchgate.net/publication/226038831_Data_Envelopment_Analysis_History_Models_and_Interpretations?enrichId=rgreq-5c78c519e6cfba0f88870989d9bb6e08-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIyNjAzODgzMTtBUzo5ODk0NzMyNjU0NTkyOEAxNDAwNjAyMjkwMTI3&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf (Erişim Tarihi: 23/08/2021).

Shen, Y., Ruan, D., Hermans, E., Brijs, T., Wets, G. and Vanhoof, K. (2011). Sustainable road transport in the European Union: Changes in undesirable impacts. *Transportation Research Record*, 2242(1), 37-44.

Song M, Guan Y. (2015). The electronic government performance of environmental protection administrations in Anhui province, China. *Technol Forecast Soc Change*, 2015;96:79-88. doi:10.1016/j.techfore.2014.10.001

Song X., Hao Y. and Zhu X. (2015). Analysis of the environmental efficiency of the Chinese transportation sector using an undesirable output slacks-based measure Data Envelopment Analysis model. *Sustainability*, 2015;7:9187-9206. DOI: 10.3390/su7079187.

Stefaniec A, Hosseini K, Xie J and Li Y. (2020). Sustainability assessment of inland transportation in China: A triple bottom line-based network VZA approach. *Transportation Research Part D*, 2020;80. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102258.

T.C. ETKB (Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı) (2024). <https://www.enerji.gov.tr/anasayfa> (Erişim tarihi: 09/11/2024).

Tian N, Tang S, Che A, Wu P. (2020). Measuring regional transport sustainability using süper-efficiency SBM-VZA with weighting preference. *Journal of Cleaner Production*. 2020;242. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.11847.

Tone K. (2004). VZAling with undesirable outputs in VZA: a slacks-based measure (SBM) approach. *North American Productivity Workshop*, 2004:44-45.

Tone, K. (2002). A slacks-based measure of süper-efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 143, 32–41.

UN (2024). From: https://sdgs.un.org/goals/goal3#targets_and_indicators . (Erişim tarihi: 09/11/2024).

Wang CN., Tran LQ., Yu CH., Ling HC. and Dang TT. (2022). Strategic Environmental Assessment of Land Transportation: An Application of VZA with Undesirable Output Approach. *Sustainability*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/su14020972>.

Wang DD. (2019). Assessing road transport sustainability by combining environmental impacts and safety concerns. *Transportation Research Part D*, 2019;77:212-223. DOI: 10.1016/j.trd.2019.10.022.

WWF. “İklim Değişikliği ve Enerji”. https://www.wwf.org.tr/ne_yapiyoruz/iklim_degisikligi_ve_enerji/ . (Erişim Tarihi: 09/11/2021)

Yılmaz, M. (2012). Türkiye’nin Enerji Potansiyeli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Açısından Önemi, *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, sayı 4 (2), s. 33-54. 2012.

Zheng Y., Qi, Z. (2010). Total factor energy efficiency of regions in China: a nonparametric analysis. *International Conference on Management Science and Engineering. Management*. 1422–1432. doi: <https://doi.org/10.1109/ICMSE.2010.5719975>. (Erişim Tarihi: 13/09/2021).

Zhou Y., Liu W., Xuying l., Chen X. and Shen M. (2019). Investigating interior driving factors and cross-industrial linkages of carbon emission efficiency in China's construction industry: Based on Super-SBM VZA and GVAR model. *Journal of Cleaner Production*. 241. 118322. 10.1016/j.jclepro.2019.118322.

Zou, G., Chen, L., Liu, W., Hong, X., Zhang, G., & Zhang, Z. (2013). Measurement and evaluation of Chinese regional energy efficiency based on provincial panel data. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(5), 1000–1009.



ÖZET

Dünyada yaşanan enerji krizleri ve ekonomik yansımaları, enerjinin toplumsal öneminin hatırlanması için her zaman kritik dönüm noktaları olmuştur. Bunlardan 1973 yılında yaşanan petrol krizi, mevcut enerji kaynaklarını çeşitlendirme ve alternatif enerji kaynaklarını araştırma noktasında tüm dünya ülkelerini arayışa yöneltmiştir. Özellikle fosil enerjiye bağımlılığı yüksek olan ülkeler, yeni sürdürülebilir enerji politikalarına odaklanmışlardır.

Enerji tüketiminin ivmelenerek arttığı 21. yüzyılda temel enerji kaynaklarının büyük çoğunluğunu fosil enerji kaynakları oluşturmaktadır. Bu yüzyılda insan kaynaklı iklim değişikliğinin etkilerinin daha da hissedilir hale gelmesi, yenilenebilir olmayan bu enerji kaynaklarının sürdürülebilirliğinin yanı sıra iklim değişikliğine neden olan sera gazlarının atmosferde birikmesine yol açması konusundaki tartışmaları alevlendirmiştir.

Enerji verimliliğinin benimsenmesi son yıllarda popüler ve uygun maliyetli bir yaklaşım haline gelmiş, enerji kaynaklarına olan talebi azaltarak ülkelerin ekonomik kalkınmasına yardımcı olmuştur. Ulaştırma sektörünün ve özellikle karayolu taşımacılığının enerji tüketimindeki önemi düşünüldüğünde, bu sektördeki enerji verimliliğinin önemi daha da artmaktadır.

Bu tezin başlıca amacı AB ülkelerinde karayolu taşımacılık sektöründeki enerji kullanımı, sektördeki hareketliliğin ürettiği sera gazı emisyonlarının miktarı ve karayolu taşımacılığı yapan firmaların mali performansı ile hareketlilik değerleri incelenerek, sosyo-ekonomik ve çevresel açıdan verimli AB ülkelerinin tespit edilmesi ve bu ülkeler için sektördeki farklılıkları analiz etmek olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Kaynakları, Enerji Verimliliği ve Üretkenliliği, Karayolu Taşımacılığı, Çevresel ve Ekonomik Verimlilik, Süper-SBM Veri Zarflama Analizi.

ABSTRACT

Energy crises and their economic repercussions in the world have always been critical turning points to remember the social importance of energy. The oil crisis of 1973 led all countries in the world to diversify their existing energy sources and research alternative energy sources. Especially countries with high dependence on fossil energy have focused on new sustainable energy policies.

In the 21st century, where energy consumption is accelerating, fossil energy sources constitute the vast majority of main energy sources. The effects of human-induced climate change have become more noticeable in this century, and this has fueled debates about the sustainability of these non-renewable energy sources as well as the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere that cause climate change.

The adoption of energy efficiency has become a popular and cost-effective approach in recent years, helping countries to develop economically by reducing the demand for energy resources. Considering the importance of the transportation sector and especially road transport in energy consumption, the importance of energy efficiency in this sector increases even more.

The main purpose of this thesis is to determine the efficient EU countries in terms of socio-economic and environmental aspects by examining the energy use in the road transport sector in EU countries, the amount of greenhouse gas emissions produced by mobility in the sector, and the financial performance and mobility values of road transport companies, and to analyze the differences in the sector for these countries.

Keywords: Energy Resources, Energy Efficiency and Productivity, Road Transportation, Environmental and Economic Efficiency, Super-SBM Data Envelopment Analysis.