



ANKARA
HACI BAYRAM VELİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Yenilenebilir Enerji Ülke Çekiciliği Endeksi (RECAI) Kapsamındaki Ülkelerde Karbon Emisyonu Belirleyicilerinin Makine Öğrenmesi ile Analizi

Doktora Tezi

Hilal ABACI ÖZDEMİR

Uluslararası Ticaret Anabilim Dalı

Uluslararası Ticaret Programı

Ankara, 2025

**Yenilenebilir Enerji Ülke Çekiciliği Endeksi (RECAI) Kapsamındaki Ülkelerde
Karbon Emisyonu Belirleyicilerinin Makine Öğrenmesi ile Analizi**

Hilal ABACI ÖZDEMİR

Prof. Dr. Yasemin KESKİN BENLİ

Tez Jürisi

Prof. Dr. Yasemin KESKİN BENLİ

Prof. Dr. Müslüme NARİN

Doç. Dr. Ayşegül ERMEÇ

Doç. Dr. Nur ÇAĞLAR ÇETİNKAYA

Dr. Öğretim Üyesi Ayyüce MEMİŞ KARATAŞ

Doktora Tezi

Uluslararası Ticaret Ana Bilim Dalı

Uluslararası Ticaret Programı

Ankara - 2025

ETİK BEYAN

Bu tezi, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Tez ve Proje Yazım Kılavuzuna uygun olarak hazırladığımı; tezin tamamında akademik kurallara ve etik ilkelere uyduğumu ifade ederim. Yararlandığım eserlerin tamamını metin içinde referanslandığımı ve kaynakçada kılavuzda tanımlanan şekilde yer verdiğimi, haricindeki ifadelerin bana ait olduğunu, herhangi bir kaynaktan kopyalama yapmadığımı ya da yapay zekâ aracılığı ile üretilmiş ifadelere metinde yer vermediğimi beyan ederim. Herhangi bir zamanda bu beyanıma uygun olmayan bir durumun tespit edilmesi halinde, aleyhime doğacak bütün hak kayıpları dahil tüm hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Hilal ABACI ÖZDEMİR

30/07/2025

ONAY

Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Uluslararası Ticaret Anabilim Dalı Uluslararası Ticaret Programı öğrencisi Hilal ABACI ÖZDEMİR tarafından hazırlanan “Yenilenebilir Enerji Ülke Çekiciliği Endeksi (RECAI) Kapsamındaki Ülkelerde Karbon Emisyonu Belirleyicilerinin Makine Öğrenmesi ile Analizi” başlıklı tez çalışması 30/07/2025 tarih ve 11:00 saatinde yapılan tez savunma sınavında aşağıdaki jüri tarafından **OY BİRLİĞİ** ile **DOKTORA TEZİ** olarak **KABUL** edilmiştir.

	Kabul	Red
Prof.Dr. Yasemin KESKİN BENLİ (Tez Danışmanı, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi)	☒	☐
Prof. Dr. Müslüme NARİN (Başkan, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi)	☒	☐
Doç. Dr. Ayşegül ERMEÇ (Üye, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi)	☒	☐
Doç. Dr. Nur ÇAĞLAR ÇETİNKAYA (Üye, Çankırı Karatekin Üniversitesi)	☒	☐
Dr. Öğretim Üyesi Ayyüce MEMİŞ KARATAŞ (Üye, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)	☒	☐

Yenilenebilir Enerji Ülke Çekiciliği Endeksi (RECAI) Kapsamındaki Ülkelerde Karbon Emisyonu Belirleyicilerinin Makine Öğrenmesi ile Analizi

Hilal ABACI ÖZDEMİR

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Yasemin KESKİN BENLİ

T.C. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Uluslararası Ticaret Ana Bilim Dalı

2025, Ankara

ÖZET

Küreselleşme ile birlikte enerji tüketimindeki artış, ormansızlaşma, tarımsal faaliyetler ve sanayileşme karbon (CO₂) emisyonlarının artışına neden olarak dünya genelinde ciddi çevresel sorunları beraberinde getirmiştir. CO₂ emisyonlarına neden olan değişkenleri belirlemek sürdürülebilir kalkınma için oldukça önemlidir. Bu sebeple çalışmanın amacı, Yenilenebilir Enerji Ülke Çekiciliği Endeksi (RECAI) kapsamındaki ülkelerde kişi başına CO₂ emisyonlarını etkileyen faktörlerin makine öğrenmesi yöntemleri ile analiz edilmesidir. Çalışmada kullanılan bağımsız değişkenler yenilenebilir enerji tüketimi, fosil enerji tüketimi, dış ticaret, doğrudan yabancı yatırımlar, ekonomik büyüme ve kentleşme; bağımlı değişken ise CO₂ emisyonudur. RECAI kapsamındaki otuz iki ülkenin 1991-2023 dönemi yıllık verileri kullanılarak WEKA 3.9.6. programı ile analiz edilmiştir. Ülkeler, kişi başına CO₂ emisyon değerlerine göre “X-Means” algoritmasıyla dört kümeye ayrılmıştır. Kümelerde yer alan ülkelerin her birine “Destek Vektör Regresyonu (SMOreg)” uygulanarak ülkelerdeki kişi başına CO₂ emisyon değerlerine etki eden değişkenler belirlenmiştir. Kümeleme analizi sonuçlarına göre kişi başına CO₂ emisyonlarını en çok artıran değişkenlerin tüm kümelerde fosil enerji tüketimi iken; en çok azaltan değişkenlerin ise Küme 0’da yenilenebilir enerji tüketimi; Küme 1’de kentleşme; Küme 2’de kentleşme, yenilenebilir enerji tüketimi ve dış ticaret; Küme 3’te ise yenilenebilir enerji tüketimi ve kentleşme olduğu belirlenmiştir. Buna göre, CO₂ emisyonlarını etkileyen değişkenlerin kümelerde farklılıklar sergilediği tespit edilmiştir. Sonuç olarak RECAI ülkelerinde kişi başına CO₂ emisyonlarını en çok artıran değişken fosil enerji tüketimi, en çok azaltan değişkenler ise yenilenebilir enerji tüketimi, kentleşme ve dış ticarettir. Elde edilen bulgular yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılmasının ve sürdürülebilir şehirleşme uygulamalarının hayata geçirilmesinin gerekliliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Karbon Emisyonu, RECAI Ülkeleri, Makine Öğrenmesi, Kümeleme Analizi, Destek Vektör Regresyonu.

Analysis of Carbon Emission Determinants in Countries Covered by the Renewable Energy Country Attractiveness Index (RECAI) Using Machine Learning

Hilal ABACI ÖZDEMİR

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Yasemin KESKİN BENLİ

Ankara Hacı Bayram Veli University, Institute of Graduate Programs

Department of International Trade and Finance

2025, Ankara

ABSTRACT

The increase in energy consumption, deforestation, agricultural activities, and industrialization along with globalization have led to an increase in carbon (CO₂) emissions, bringing about serious environmental problems worldwide. Identifying the variables that cause CO₂ emissions is crucial for sustainable development. Therefore, the aim of this study is to analyze the factors affecting per capita CO₂ emissions in countries covered by the Renewable Energy Country Attractiveness Index (RECAI) using machine learning methods. The independent variables used in the study are renewable energy consumption, fossil energy consumption, foreign trade, foreign direct investment, economic growth, and urbanization, while the dependent variable is CO₂ emissions. Annual data for the period 1991-2023 for thirty-two countries covered by RECAI were analyzed using the WEKA 3.9.6 program. Countries were divided into four clusters according to their per capita CO₂ emission values using the "X-Means" algorithm. Support Vector Regression (SMOreg) was applied to each country in each cluster to determine the variables affecting per capita CO₂ emission values in these countries. According to the cluster analysis results, the variables that most significantly increase per capita CO₂ emissions across all clusters are fossil energy consumption, while the variables that most significantly decrease them are renewable energy consumption in Cluster 0; urbanization in Cluster 1; urbanization, renewable energy consumption, and foreign trade in Cluster 2; and renewable energy consumption and urbanization in Cluster 3. Accordingly, it was determined that the variables affecting CO₂ emissions differ across clusters. Consequently, the variables that most significantly increase per capita CO₂ emissions in RECAI countries are fossil energy consumption, while the variables that most significantly decrease them are renewable energy consumption, urbanization, and foreign trade. The findings demonstrate the necessity of increasing renewable energy investments and implementing sustainable urbanization practices.

Keywords: Carbon Emissions, RECAI Countries, Machine Learning, Clustering, Support Vector Regression.

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmam süresince bilgi birikimi, hoşgörüsü ve yönlendirmeleriyle bana yol gösteren; sabrı, yapıcı eleştirileri ve desteği sayesinde araştırma sürecimi daha verimli ve anlamlı kılan danışman hocam saygıdeğer Prof. Dr. Yasemin KESKİN BENLİ'ye şükranlarımı sunarım. Kendisi hayatımda nazik, anlayışlı ve her zaman yapıcı tutumuyla yalnızca bir akademisyen değil, aynı zamanda örnek alınacak bir insan olmuştur. Bilimsel düşünceye bakış açıma katkı sağlayan, araştırma yolculuğum boyunca her adımda güven, cesaret ve ilham kaynağı olan kıymetli hocamın üzerimdeki emeklerini daima minnet ve saygıyla anacağım.

Tanıştığımız günden bu yana her zaman yanımda olan gerek akademik gerekse kişisel her konuda desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini büyük bir içtenlikle paylaşan kıymetli hocam Prof. Dr. Müslüme NARİN'e çok teşekkür ederim. Tez izleme komitesinde ve tez jürisinde bulunarak tez çalışmam sürecinde yapmış olduğu yol gösterici tavsiyeleri, samimi ilgisi ve yapıcı eleştirileriyle akademik gelişimime çok önemli katkılarda bulunmuştur. Kendisine yalnızca akademik bir rehber olarak değil, aynı zamanda insani yönüyle de örnek bir hoca olduğu için gönülden teşekkür ederim. Tez izleme komitesinde ve tez jürisinde yer alarak akademik bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, yapıcı değerlendirmeleriyle eksiklerimi görmeme yardımcı olan ve tez çalışmamın daha iyi bir noktaya ulaşması için büyük bir özveriyle katkı sunan sevgili hocam Doç. Dr. Ayşegül ERMEÇ'e en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Bir yılı aşkın süredir bölüm başkanım olarak görev yapan ve bu süre boyunca bana her konuda destek olan, tez jürimde yer alarak akademik bilgi ve tecrübeleriyle çalışmamın daha nitelikli ve kapsamlı bir hâl alması için değerli katkılar sunan sevgili hocam Doç. Dr. Nur ÇAĞLAR ÇETİNKAYA'ya sonsuz teşekkür ederim. Tez jürimde yer alarak tez çalışmamın nitelikli ve anlamlı bir hâle gelmesine katkı sunan; bilgi, tecrübe ve yapıcı değerlendirmelerini benimle paylaşarak sürecime ışık tutan sevgili hocam Dr. Öğretim Üyesi Ayyüce MEMİŞ KARATAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik rehberliğinin yanı sıra her zaman gösterdiği destek, samimiyeti ve sevgisiyle bu zorlu yolculuğu benim için daha verimli ve değerli kıldığı için kendisine teşekkür eder, sevgilerimi sunarım. Ayrıca Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Uluslararası Ticaret ve Finansman bölümündeki tüm öğretim üyesi hocalarıma doktora sürecim boyunca bilgi, tecrübe ve katkılarıyla bana kazandırdıkları için teşekkür ederim.

Tez sürecim boyunca sabrı, sevgisi ve anlayışıyla her zaman yanımda olan, desteğiyle bana güç veren sevgili eşim, hayatım Dr. Öğretim Üyesi Bedri Münir ÖZDEMİR'e çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
Özet	iv
Abstract	v
Teşekkür	vi
İçindekiler	vii
Tabloların Listesi.....	ix
Şekillerin Listesi	xii
Simgeler Dizini	xiii
Kısaltmalar Dizini	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KARBON (CO ₂) EMİSYONU VE CO ₂ EMİSYONU İLE İLGİLİ ANLAŞMALAR, POLİTİKALAR VE TEORİK YAKLAŞIMLAR	5
2.1. CO ₂ Emisyonu ve CO ₂ Emisyonunun Oluşma Nedenleri.....	5
2.1.1. Enerji Kaynaklı CO ₂ Emisyonu Salınımı	10
2.1.2. Ormansızlaşma ve Tarımsal Faaliyet Kaynaklı CO ₂ Emisyonu Salınımı.....	29
2.2. CO ₂ Emisyonu ile İlgili Anlaşmalar ve Politikalar	30
2.2.1. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sözleşmesi (UNFCCC)	30
2.2.2. Kyoto Protokolü	31
2.2.3. Paris İklim Anlaşması	34
2.2.4. Glasgow İklim Paketi.....	35
2.2.5. Avrupa Yeşil Mutabakatı (AYM).....	36
2.3. CO ₂ Emisyonu ile İlgili Teorik Yaklaşımlar	37
2.3.1. Ekolojik Modernleşme Teorisi (EMT).....	38
2.3.2. Çevresel Kuznets Eğrisi (ÇKE)	41
2.3.3. Kirlilik Cenneti (Sığınağı) Hipotezi (KCH).....	42
2.3.4. Antweiler, Copeland ve Taylor (ACT) Yaklaşımı	43
2.3.5. Negatif Dışsallıklar Teorisi ve Karbon Vergisi Yaklaşımı	45
2.3.6. STIRPAT (Nüfus, Refah ve Teknolojinin Stokastik Etkileri) Modeli.....	46
3. LİTERATÜR TARAMASI.....	49
4. KARBON EMİSYONLARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN RECAİ ÜLKELERİNDE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE ANALİZİ.....	73
4.1. Araştırmanın Önemi ve Amacı.....	73

4.2. Araştırmanın Kapsam ve Sınırlılıkları	74
4.3. Araştırmanın Veri Seti ve Analizi.....	75
4.4. Araştırmanın Yöntem ve Modeli.....	76
4.4.1. Araştırmanın Yöntemi	76
4.4.2. Araştırmanın Modeli	87
4.5. Araştırmanın Bulguları.....	87
4.5.1. Araştırmanın Tanımlayıcı İstatistikleri.....	88
4.5.2. Kümeleme Analizi Bulguları	92
4.5.3. Destek Vektör Regresyonu Bulguları.....	97
5. SONUÇ	181
Extended Abstract	189
Kaynakça.....	195
Özgeçmiş.....	223

TABLÖLARIN LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Fosil Yakıtlar ve Sanayi Kaynaklı Kişi Başına CO ₂ Emisyonu En Yüksek Olan İlk On Ülke (2023, Ton).....	7
Tablo 2.2. Toplam CO ₂ Emisyonları Açısından İlk On Ülke ve Kişi Başına CO ₂ Emisyon Miktarları ile Dünya Toplam Emisyonlarındaki Payları (2023, Ton)	8
Tablo 2.3. Çalışmada Yer Alan RECAI Ülkelerinde CO ₂ Emisyon Değerleri (2023).....	9
Tablo 2.4. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yaygınlaştırılmasına Engel Olan Faktörler	13
Tablo 2.5. Dünya ve Bölgelere Göre Yenilenebilir Enerji Kurulu Kapasitesi (2020-2024, MW)	15
Tablo 2.6. Dünya ve Bölgelere Göre Yenilenebilir Enerjinin Elektrik Üretim Kapasitesindeki Payı (2020-2024, %).....	16
Tablo 2.7. Yenilenebilir Enerji Üretimi En Yüksek 10 Ülke (2023, TWh).....	17
Tablo 2.8. Çalışmada Yer Alan RECAI Ülkelerinde Toplam Yenilenebilir Enerji Üretim Miktarları (2023, Ton)	18
Tablo 2.9. Dünya Toplam Hidroelektrik Kurulu Elektrik Kapasitesi	20
(2015-2024, MW)	20
Tablo 2.10. Dünya Toplam Güneş Enerjisi Kurulu Elektrik Kapasitesi (2015-2024 MW)	21
Tablo 2.11. Dünya Toplam Rüzgâr Enerjisi Toplam Kurulu Elektrik Kapasitesi (2015-2024, MW)	22
Tablo 2.12. Dünya Toplam Biyokütle Enerjisi Kurulu Elektrik Kapasitesi	23
(2015-2024, MW)	23
Tablo 2.13. Dünya Toplam Jeotermal Enerjisi Kurulu Elektrik Kapasitesi	24
(2015-2024, MW)	24
Tablo 2.14. Kömürün Dünya Toplam Birincil Enerji Tüketimindeki Payı (2015-2023, %).....	26
Tablo 2.15. Petrolün Dünya Toplam Birincil Enerji Tüketimindeki Payı (2015-2023, %).....	26
Tablo 2.16. Doğalgazın Dünya Toplam Birincil Enerji Tüketimindeki Payı (2015-2023, %)	27

Tablo 2.17. Dünya Fosil Enerji Tüketimi En Yüksek 10 Ülke (2023, TWh)	27
Tablo 2.18. Çalışmada Yer Alan RECAI Ülkelerinde Toplam Fosil Enerji Tüketim Miktarları (2023, TWh)	28
Tablo 2.19. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sözleşmesi (UNFCCC) ve Kyoto Protokolü Arasındaki Temel Farklılıklar	32
Tablo 2.20. CO ₂ Emisyonu ile İlgili Teorik Yaklaşımlar ve Açıklanan Değişkenler	38
Tablo 3.1. Literatür Taraması Özet Tablosu	65
Tablo 4.1. Yenilenebilir Enerji Ülke Çekiciliği Endeksi (RECAI) Kapsamında Yer Alan Ülkeler (2021)	75
Tablo 4.2. Değişkenler, Veri seti ve Veri Kaynakları.....	76
Tablo 4.3. Destek Vektör Makinelerinde Kullanılan Temel Kernel Fonksiyonları	84
Tablo 4.4. Bağımsız Değişkenlere Ait Tanımlayıcı İstatistikler.....	88
Tablo 4.5. X-Means Algoritması Sonucu Elde Edilen Kümeler ve Ülkelerin Dağılımı	92
Tablo 4.6. Küme 0 Ülkeleri için Kişi Başına CO ₂ Emisyon Değerlerine Ait Tanımlayıcı İstatistikleri	94
Tablo 4.7. Küme 1 Ülkeleri için Kişi Başına CO ₂ Emisyon Değerlerine Ait Tanımlayıcı İstatistikleri	95
Tablo 4.8. Küme 2 Ülkeleri için Kişi Başına CO ₂ Emisyon Değerlerine Ait Tanımlayıcı İstatistikleri	96
Tablo 4.9. Küme 3 Ülkeleri için Kişi Başına CO ₂ Emisyon Değerlerine Ait Tanımlayıcı İstatistikleri	97
Tablo 4.10. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: ABD	98
Tablo 4.11. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Avustralya	100
Tablo 4.12. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Kanada	102
Tablo 4.13. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Küme 0 Özet Tablosu	104
Tablo 4.14. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Birleşik Krallık.....	106
Tablo 4.15. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Almanya	108
Tablo 4.16. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Belçika	110
Tablo 4.17. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Danimarka.....	113
Tablo 4.18. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Finlandiya	115
Tablo 4.19. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Hollanda	117

Tablo 4.20. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: İrlanda	120
Tablo 4.21. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: İsrail	122
Tablo 4.22. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Japonya	124
Tablo 4.23. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Norveç.....	127
Tablo 4.24. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Güney Kore.....	129
Tablo 4.25. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Güney Afrika	132
Tablo 4.26. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Küme 1 Özet Tablosu	134
Tablo 4.27. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Çin.....	136
Tablo 4.28. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: İspanya	138
Tablo 4.29. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: İtalya	141
Tablo 4.30. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Yunanistan	143
Tablo 4.31. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Fransa	146
Tablo 4.32. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: İsveç	148
Tablo 4.33. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: İsviçre.....	151
Tablo 4.34. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Macaristan.....	153
Tablo 4.35. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Küme 2 Özet Tablosu	155
Tablo 4.36. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Arjantin	157
Tablo 4.37. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Brezilya	160
Tablo 4.38. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Endonezya.....	162
Tablo 4.39. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Fas	165
Tablo 4.40. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Meksika.....	167
Tablo 4.41. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Mısır	169
Tablo 4.42. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Şili	172
Tablo 4.43. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Türkiye.....	174
Tablo 4.44. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Hindistan	176
Tablo 4.45. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Küme 3 Özet Tablosu	179

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Fosil Yakıt ve Sanayi Kaynaklı Kümülatif CO ₂ Emisyonları (1750-2023, Ton).....	6
Şekil 2.2. Dünya Toplam Fosil Yakıt Tüketimi (1800-2023, TWh).....	25
Şekil 2.3. Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın Temel Hedef ve Alanları	37



SİMGELER DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
ϵ	Epsilon
Σ	Sigma (Toplam sembolü)



KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
3SLS	Üç Aşamalı En Küçük Kareler
AAU	Belirlenmiş Azaltım Birimleri
AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ACT	Antweiler, Copeland ve Taylor Yaklaşımı
AGDP	Düzeltilmiş Gayrisafi Yurtiçi Hasıla
ANN	Yapay Sinir Ağları
ARDL	Dağıtılmış Gecikmeli Model
ASEAN	Güneydoğu Asya Uluslar Birliği
AYM	Avrupa Yeşil Mutabakatı
BIC	Bayes Bilgi Kriteri
BM	Birleşmiş Milletler
BPNN	Geri Yayılım Sinir Ağına
BRICS	Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin, Güney Afrika
BRICT	Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin, Türkiye
CADF	Covariate Augmented Dickey-Fuller
CC	Korelasyon Katsayısı
CCR	Kanonik Eşbütünleşme Regresyonu
CDM	Temiz Kalkınma Mekanizması
CER	Sertifikalandırılmış Emisyon Azaltma Kredisi
CH ₄	Metan
CO ₂	Karbondiyoksit
COP	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Taraflar Konferansı
ÇKE	Çevresel Kuznets Eğrisi

D2C	Causal Direction from Dependency
DH	Dumitrescu-Hurlin Panel Nedensellik Testi
DL	Derin Öğrenme
DOLS	Dinamik En Küçük Kareler
DOLSMG	Dinamik En Küçük Kareler Ortalama Grup Tahmincisi
DVM	Destek Vektör Makineleri
DVR	Destek Vektör Regresyonu
DYNARDL	Dinamik Otoregresif Dağıtılmış Gecikmeli Model
DYY	Doğrudan Yabancı Yatırımlar
EMT	Ekolojik Modernleşme Teorisi
ERU	Emisyon Azaltım Birimi
ETS	Emisyon Ticareti Sistemi
FD	Finansal Gelişme
FDIG	Doğrudan Yabancı Yatırım Oranı
FE	Sabit Etkiler
FET	Fosil Enerji Tüketimi
FMOLS	Tam Modifiye Edilmiş En Küçük Kareler
Gauss-RBF	Radyal Tabanlı Fonksiyon
GHG	Sera Gazı
GMM	Genelleştirilmiş Momentler Yöntemi
GMM-PVAR	Genelleştirilmiş Momentler Yöntemi ile Panel Vektör Otoregresyon
GSYİH	Gayri Safi Yurtiçi Hasıla
GUW	Gengenbach, Urbain ve Westerlund Panel Eşbütünleşme Testi
GW	Gigawatt
HES	Hidroelektrik Santralleri
HQE	Yüksek Enerjili Binalar

INDC	Ulusal Katkı Beyanları
IRENA	International Renewable Energy Agency
KCH	Kirlilik Cenneti Hipotezi
KENT	Kentleşme
KL	Sermaye-İşgücü Oranı
KRLS	Çekirdek Tabanlı Düzenleştirilmiş En Küçük Kareler
LM	Levenberg-Marquardt Algoritması
LMDI	Logaritmik Ortalama Divisia İndeksi
LSTM	Uzun Kısa Dönem Bellek
LULUCF	Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık
MAE	Ortalama Mutlak Hata
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hata
MINT	Meksika, Endonezya, Nijerya, Türkiye
ML	Makine Öğrenmesi
MSE	Modelin Ortalama Kare Hatası
MW	Megavat
N ₂ O	Diazot Monoksit
NARDL	Non-linear Otoregresif Dağıtılmış Gecikmeli Model
NDC	Ulusal Katkı Beyanları
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
PTIFEs	Etkileşimli Sabit Etkilerle Geliştirilmiş Panel Eşik Modeli
PUK	Pearson VII Fonsiyonu Tabanlı Çekirdek
QR	Kuantil Regresyon
RAE	Görelî Mutlak Hata
RE	Rasgele Etkiler
RECAI	Yenilenebilir Enerji Ülke Çekiciliği Endeksi
RES	Rüzgâr Enerjisi Santralleri

RMSE	Kök Ortalama Kare Hata
RRSE	Kök Göreli Kare Hata
SDG7	Sürdürülebilir Kalkınma Amacı 7
SE-SBM	Süper Verimlilik Slack Tabanlı Ölçüm
SKDM	Sınırdaki Karbon Düzenlemesi Mekanizması
SLM U	Sasabuchi–Lind–Mehlum U Testi
SMOreg	Sıralı Minimal Optimizasyona Dayalı regresyon
STIRPAT	Nüfus, Refah ve Teknoloji Üzerinden Regresyona Dayalı Stokastik Etkiler
TECH	Ar-Ge Yoğunluğu
TRADEG	Dış Ticaret Bağımlılık Oranı
Twh	Terawatt-Saat
UNFCCC	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
VECM	Vektör Hata Düzeltme Modeli
VER	Gönüllü Emisyon Azaltımı
YET	Yenilenebilir Enerji Tüketimi

1. GİRİŞ

Küresel ısınma, gün geçtikçe artan tüketim alışkanlıkları ve özellikle sanayileşmenin etkisiyle birlikte çevre sorunları belirgin hale gelmiş ve buna bağlı olarak sera gazı emisyonlarında ciddi artışlar gözlemlenmiştir. Sera gazı emisyonları yalnızca karbondioksit (CO₂) emisyonundan ibaret değildir. Sera gazlarını metan (CH₄), diazot monoksit (N₂O) gibi pek çok farklı bileşende oluşturmaktadır (Jin ve Kim, 2018: 464). Bununla birlikte, benzin, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtların kullanılmasıyla ortaya çıkan CO₂ emisyonları sera etkisine neden olan temel emisyon türüdür (Bozkurt ve Okumuş, 2015: 24). CO₂ emisyonları fosil yakıtların yakılması, endüstriyel faaliyetler, ormansızlaşma ve tarımsal faaliyetler gibi insan kaynaklı faaliyetlerin yürütülmesinden dolayı artış göstermektedir (Kavas ve Çoban, 2023; Arık ve Hamamcıoğlu, 2024: 141). CO₂ emisyon değerlerindeki artışı ise sadece çevresel değil aynı zamanda sosyal ve ekonomik sonuçlar da doğurmaktadır.

İklim değişikliği, çölleşme, biyolojik çeşitlilik kaybı, ormansızlaşma, ozon tabakasının tahribatı, hava, su ve toprak kirliliği, tehlikeli ve plastik atıklar, deniz ve okyanus kirliliği gibi çevre sorunlarına bağlı olarak meydana gelen CO₂ emisyonları sürdürülebilir kalkınmanın önünde tehdit haline gelmiştir. Bu nedenle CO₂ emisyonları ülkelerin hazırladıkları bilimsel rapor ve uluslararası çevre politikaları içerisine dahil edilmeye başlanmıştır. Bu açıdan 1972 yılında çevre sorunları uluslararası düzeyde ilk kez Stockholm Birleşmiş Milletler (BM) İnsan Çevresi Konferansı'nda ele alınmıştır. 1987 yılında ise Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu'nca hazırlanan ve Brundtland Raporu olarak da bilinen "Ortak Geleceğimiz" başlıklı rapor ile sürdürülebilir kalkınma kavramı uluslararası düzeyde tanımlanmıştır (Kaman ve Bozkurt, 2025: 301; T.C. Dışişleri Bakanlığı [MFA], t.y.-a). Raporda sürdürülebilirlik, "geleceğin ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarını karşılayan kalkınma" şeklinde ifade tanımlanırken, kavram ilk kez açık bir şekilde kullanılmıştır (Sachs vd., 2019, akt. Yiğit ve Canöz, 2022: 38). 1997 yılında kabul edilen Kyoto Protokolü ile sera gazı emisyonlarını azaltmak için zorunlu önlemler yerine serbest piyasa mekanizmasına dayalı esneklik mekanizmalarını benimseyen bir yaklaşım benimsenmiştir (Konak, 2011: 156). Daha sonra ise sürdürülebilir kalkınma adına çevre konulu çeşitli uluslararası toplantılar düzenlenmiştir. Bu toplantılar ile ekonomik büyüme sağlanırken, çevrenin de zarar

görmeden ileri nesillere aktarılabilir şekilde korunması amaçlanmaktadır. Örneğin 2015 yılında Paris'te gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Taraflar Konferansı (COP21) sonucunda kabul edilen Paris Anlaşması, dünyayı düşük karbonlu, dayanıklı, adil ve sürdürülebilir bir geleceğe yönlendirme hedefiyle öne çıkmakta ve bu yönüyle iklim değişikliğiyle mücadelede küresel ölçekte önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilmektedir (Waskow ve Morgan, 2015). 2021 yılı COP26'da gerçekleştirilen zirvede Glasgow İklim Paketi'nin kabul edilmesiyle 2030 ve 2050 yıllarına kadar olan süreçte fosil yakıt kullanımının aşamalı olarak azaltılması ve net sıfır emisyonlara ulaşılması hedefi koyulmuştur (Özkan, 2024: 3300). Glasgow İklim Paketi, fosil yakıtların kademeli şekilde azaltılmasını hatta sıfırlanmasını amaçlamış olsa da gelişmiş ülkeler ile gelişmekte olan ülkeler arasında iklim finansmanı, uyum mekanizmaları ve kayıp-zarar konularında ciddi görüş ayrılıkları oluşmuştur. Gelişmekte olan ülkeler için beklenen iklim adaleti, finansal destek ve zarar tazmini gibi beklentiler tam olarak karşılanamamıştır (Hunter vd., 2021: 5-6). Avrupa Yeşil Mutabakatı ise Avrupa Birliği (AB)'nin 2050 yılına kadar net sıfır sera gazı emisyonuna ulaşmayı hedefleyen bir AB stratejisi olarak oluşturulmuştur (Catuti vd., 2020: 1). Kısacası sanayileşme süreci, fosil yakıtlara bağlı enerji üretimi ve hızla artan tüketim eğilimleri karbon emisyonlarının küresel ölçekte ciddi boyutlara ulaşmasına yol açmıştır. Bu nedenle uluslararası düzeyde yürütülen çevre politikalarında CO₂ emisyonlarının azaltılması kritik bir öncelik haline gelmiştir. Emisyon artışına neden olan unsurların bilimsel yöntemlerle analiz edilmesi ve elde edilen bulguların politika üretiminde kullanılması sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu doğrultuda çalışmanın amacı, Yenilenebilir Enerji Ülke Çekiciliği Endeksi (RECAI) kapsamında yer alan ülkelere kişi başına düşen CO₂ emisyonunu etkileyen faktörleri makine öğrenmesi yöntemleri aracılığıyla tespit etmektir. Araştırma sürecinde öncelikle RECAI ülkeleri kişi başına CO₂ emisyon miktarlarına göre X-Means algoritması yardımıyla kümelenmiş ve benzer kişi başına emisyon seviyelerine sahip ülke grupları oluşturulmuştur. Kümelerde yer alan her bir ülke için kişi başına CO₂ emisyonlarına etki eden değişkenlerin etkileri destek vektör regresyonu (DVR) ile analiz edilmiştir. Bu analiz sayesinde ülkelerin her biri için CO₂ emisyonlarına en fazla ve en az katkı sağlayan değişkenler belirlenmiştir. Son aşamada ise elde edilen bulgular doğrultusunda küme bazlı değerlendirmeler yapılmıştır. Böylece benzer kişi

başına CO₂ emisyonlarına sahip ülkeler bir arada incelenmiş ve ardından gruplar arası karşılaştırma ile “yüksek, orta-yüksek, orta ve düşük” kişi başına CO₂ emisyonlarına sahip olan ülke kümeleri birbirleriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu açıdan çalışmanın hem bilimsel özgünlüğü hem de literatüre katkı potansiyeli güçlendirilmiştir.

Tez kapsamında yürütülen çalışmada aşağıdaki araştırma sorularına yanıt aranmıştır:

- ✓ RECAI ülkelerinde kişi başına düşen karbon emisyonlarını belirleyen faktörler nelerdir ve bu faktörler ülke grupları arasında nasıl farklılık göstermektedir?
- ✓ RECAI ülkeleri kişi başına CO₂ emisyonları bakımından hangi kümelere ayrılmaktadır?
- ✓ Küme içindeki ülkeler CO₂ emisyonlarını etkileyen değişkenler açısından hangi benzerlik ve farklılıkları göstermektedir?
- ✓ Oluşan ülke kümelerinde hangi değişkenler baskın belirleyiciler olarak öne çıkmaktadır?
- ✓ Yenilenebilir enerji tüketimi ve fosil enerji tüketimi, kişi başına CO₂ emisyonlarını nasıl etkilemektedir?
- ✓ Ekonomik büyüme düzeyi, kişi başına CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini hangi yönde göstermektedir?
- ✓ Uluslararası ticaret hacmi, kişi başına CO₂ emisyonlarını nasıl etkilemektedir?
- ✓ Doğrudan yabancı yatırım miktarının kişi başına CO₂ emisyonları üzerindeki etkileri nelerdir ve bu etkiler ülke kümeleri arasında anlamlı farklılık göstermekte midir?
- ✓ Nüfusun kentlerde yoğunlaşması kişi başına CO₂ emisyonları üzerinde nasıl bir etki yaratmaktadır?

Çalışmanın birinci bölümünde çalışmaya giriş yapılarak çalışma hakkında genel bilgiler sunulmuştur. İkinci bölümünde, CO₂ emisyonu ve CO₂ emisyonlarını etkileyen faktörler detaylı bir şekilde incelenmiştir. CO₂ emisyonunu azaltmaya

yönelik uluslararası iklim anlaşmaları ile karbon politikalarına yer verilmiştir. Ayrıca CO₂ emisyonlarını etkileyen faktörler açısından geliştirilen teorik yaklaşımlar incelenmiştir. Üçüncü bölümde literatürde CO₂ emisyonu üzerine gerçekleştirilen çalışmalar ayrıntılı bir şekilde açıklanmış ve özet bir tablo şeklinde sunulmuştur. Dördüncü bölümde, RECAI ülkelerinde CO₂ emisyonlarını etkileyen faktörlerin makine öğrenmesi ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm içerisinde araştırmanın önemi ve amacı, kapsam ve sınırlıkları, veri seti ve analizi, yöntem ve modeli ile araştırmanın bulguları yer almaktadır. Sonuç bölümünde, araştırmanın bulguları özetlenmiş; elde edilen sonuçlar hem literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmış hem de CO₂ emisyonlarını açıklayan teoriler açısından da değerlendirilmiştir. Son olarak gelecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.

2. KARBON (CO₂) EMİSYONU VE CO₂ EMİSYONU İLE İLGİLİ ANLAŞMALAR, POLİTİKALAR VE TEORİK YAKLAŞIMLAR

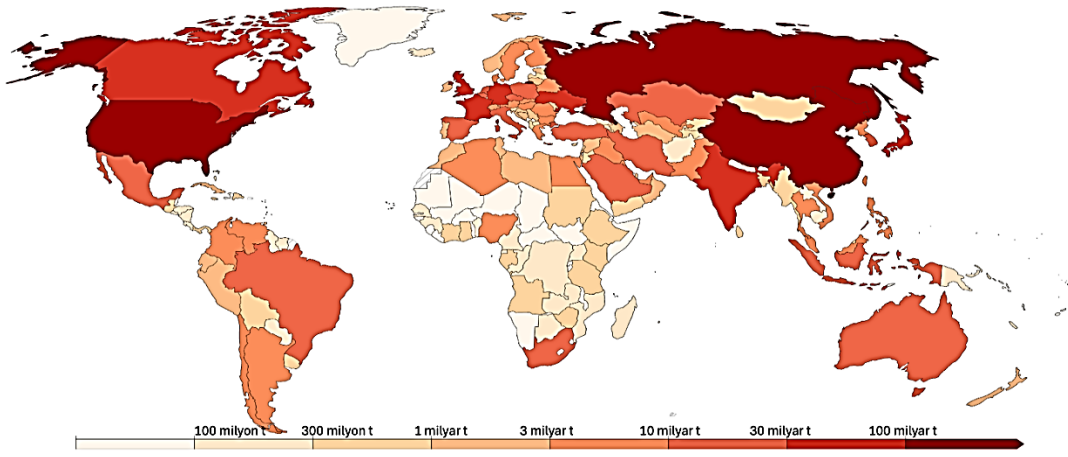
Bu bölümde CO₂ emisyonu ve oluşma nedenleri, CO₂ emisyonunu azaltmaya yönelik ülkelerarası yapılan anlaşma ve politikalar ile CO₂ emisyonu ile ilgili iktisat literatüründe yer alan teorik yaklaşımlar açıklanmaktadır.

2.1. CO₂ Emisyonu ve CO₂ Emisyonunun Oluşma Nedenleri

Global çapta süregelen küresel ısınma tüm dünyayı, hem çevresel düzeyde sebep olduğu bozulmalar hem de ekonomik sonuçları nedeniyle tehdit etmektedir. Küresel ısınmanın ana sebebi ise fosil yakıtların yakılmasıyla ortaya çıkan sera gazı emisyonlarıdır (Disli vd., 2016: 419). Özellikle karbondioksit (CO₂) emisyonları çevreye olan etkisi bakımından kritik öneme sahiptir. CO₂ emisyonları aslında dünyanın doğal yaşam döngüsü içerisinde doğal olarak yer almaktadır; ancak sanayileşme ve fosil yakıt kullanımı gibi çeşitli faaliyetlerden ötürü bu emisyonlar giderek artış göstermiştir (Baek, 2016: 352; Wang ve Liu, 2017: 204). Berner'e (1999) göre karbon döngüsü, karbonun atmosfer, okyanuslar, toprak, biyosfer ve kayaçlar arasında sürekli olarak hareket ettiği doğal bir süreçtir ve atmosfer, okyanuslar, kara ekosistemleri, toprak ve kayaçlar bu döngüde yer alan temel bileşenlerdir. Bu döngü, zaman ölçeğine göre ikiye ayrılmaktadır. Kısa vadeli karbon döngüsünde, atmosfer ile bitkiler, toprak ve denizler arasındaki karbon alışverişi öne çıkmaktadır. Özellikle fosil yakıt kullanımı ve ormansızlaşma gibi insan kaynaklı etkiler bu süreç üzerinde belirleyici hale gelmiştir. Uzun vadeli döngü ise karbonun jeolojik zamanlarda kayaçlarla olan etkileşimini kapsamakta ve milyonlarca yıl boyunca atmosferdeki karbondioksit ve oksijen seviyelerinin belirlenmesinde temel rol oynamaktadır. Günümüzde özellikle insan faaliyetleri, bu doğal sistemin işleyişine müdahale ederek karbon döngüsünün dengesini bozmakta ve iklim problemlerine neden olmaktadır. Churkina'ya (2008) göre karbon döngüsü yalnızca fiziksel ve kimyasal süreçlerden ibaret olmayan; bitkiler, mikroorganizmalar, hayvanlar ve insan faaliyetlerinin de etkili olduğu dinamik bir sistemdir. Keller vd. (2018) ise karbon döngüsü dört temel aşama ile açıklamaktadır. Birinci aşama, insan etkisinin henüz ortaya çıkmadığı doğal dengenin korunduğu dönemdir. İkinci aşamada sanayi çağında fosil yakıtların kullanılmasıyla birlikte karbon döngüsünde bozulmalar başlamaktadır. Üçüncü aşamada karbon giderim teknolojilerinin devreye girdiği, ancak net CO₂

emisyonlarının hâlâ pozitif olduğu geçiş süreci gerçekleştirmektedir. Dördüncü ve son aşamada ise atmosferden uzaklaştırılan CO₂ miktarının salınan miktarı aşmasıyla net negatif emisyon durumuna gelinmektedir.

Karbon döngüsünün bozulmasıyla birlikte sera gazlarının atmosferdeki ısınma üzerindeki etkisi daha da kritik bir hale gelmiştir. Sera gazları Dünya'nın yaydığı ısının bir kısmını tutarak atmosferde sıcaklığın artmasına yol açar. Bu gazlar arasında, CO₂ öne çıkmaktadır. Son yıllarda CO₂ seviyeleri, fosil yakıt tüketimindeki artış, arazi örtüsündeki dönüşümler ve çimento üretimi gibi insan faaliyetleriyle birlikte olağanüstü bir hızla yükselmektedir (Keller vd., 2018: 250). 2023 yılı itibarıyla yalnızca fosil yakıt kullanımı ve sanayi faaliyetlerinden kaynaklanan CO₂ emisyonları, küresel düzeyde yaklaşık 37,79 milyar ton olarak gerçekleşmiştir. Bu değerin kişi başına düşen karşılığı ise 4,7 ton'dur (Our World in Data, 2024a). Bu miktar iklim değişikliğiyle mücadelede ne denli kritik bir eşiğe gelindiğini göstermekte ve insan kaynaklı faaliyetlerin atmosfer üzerindeki baskısını açık biçimde ortaya koymaktadır. Ayrıca söz konusu emisyon değerinin yalnızca enerji ve sanayi sektörüne ait olup, arazi kullanımı değişiklikleri ve diğer sera gazları hesaba katıldığında toplam karbon yükünün çok daha yüksek düzeylere çıkabileceği görülmektedir. Bu durum sera gazı azaltım politikalarının daha kapsamlı, hızlı ve etkili bir şekilde uygulanmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Şekil 2.1'de 1750-2023 arası fosil yakıt ve sanayi kaynaklı kümülatif CO₂ emisyonları dünya görünümü sunulmuştur.



Şekil 2.1. Fosil Yakıt ve Sanayi Kaynaklı Kümülatif CO₂ Emisyonları (1750-2023, Ton)

Kaynak: Our World in Data (2024b).

Şekil 2.1'e göre, 1750-2023 yılları arasında fosil yakıt kullanımı ve sanayi faaliyetlerinden kaynaklanan birikimli CO₂ emisyonlarının en yoğun olduğu bölgelerin, sanayileşmiş ve yüksek gelir düzeyine sahip ülkelerin bulunduğu Kuzey Amerika, Avrupa ve Doğu Asya olduğu görülmektedir. Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Çin, Rusya ve Almanya tarih boyunca CO₂ emisyon salınımını yoğun bir şekilde gerçekleştiren ülkeler olarak görülmektedir. Buna karşılık Afrika Kıtası ve Güneydoğu Asya'nın birçok bölgesinde emisyon düzeyleri oldukça düşüktür. Tablo 2.1'de 2023 yılında fosil yakıtlar ve sanayi kaynaklı kişi başına CO₂ emisyonu en yüksek olan ilk on ülke ile bu ülkelere ait emisyon değerleri (ton cinsinden) sunulmuştur.

Tablo 2.1. Fosil Yakıtlar ve Sanayi Kaynaklı Kişi Başına CO₂ Emisyonu En Yüksek Olan İlk On Ülke (2023, Ton)

Ülke	Kişi Başına CO ₂ Emisyon Miktarı (Ton)
Katar	38,8
Brunei	25,6
Bahreyn	23,3
Trinidad ve Tobago	22,8
Suudi Arabistan	22,1
Birleşik Arap Emirlikleri	21,6
Kuveyt	20,5
Sint Maarten (Hollanda kısmı)	16,2
Umman	15,5
Faroe Adaları	14,6

Kaynak: Our World in Data (2024c).

Tablo 2.1'e göre, 2023 yılı itibarıyla yalnızca fosil yakıt kullanımı ve sanayi faaliyetlerinden kaynaklanan kişi başına CO₂ emisyonlarının en yüksek olduğu ülkelerin genellikle enerji ihracatına dayalı ekonomilere sahip ve nüfusu görece düşük ülkelere oluştugu görülmektedir. Tablo 2.2'de 2023 yılı toplam CO₂ emisyonları açısından ilk on ülkenin sıralaması ve bu ülkelerin kişi başına CO₂ emisyon miktarları ile dünya toplam emisyonları içerisindeki payları sunulmuştur.

Tablo 2.2. Toplam CO₂ Emisyonları Açısından İlk On Ülke ve Kişi Başına CO₂ Emisyon Miktarları ile Dünya Toplam Emisyonlarındaki Payları (2023, Ton)

Ülkeler	Toplam CO ₂ Emisyon Miktarı (milyon ton)	Kişi Başına CO ₂ Emisyon Miktarı (ton/kişi)	Dünya Toplam Emisyonlarındaki Payı (%)
Çin	13.260	9,24	%33,98
ABD	4.682	13,8	%12
Hindistan	2.955	2,07	%7,57
Rusya	2.070	14,4	%5,3
Japonya	945	7,54	%2,42
İran	779	9,1	%2
Endonezya	675	2,41	%1,73
Suudi Arabistan	623	17,1	%1,6
Almanya	583	7,06	%1,49
Kanada	575	14,9	%1,47

Kaynak: World Population Review (t.y.-a).

Tablo 2.2'ye göre, dünyada en çok CO₂ emisyonuna neden olan ülke Çin'dir. Çin, 13.260 milyon tonluk toplam emisyonu ile dünya emisyonlarının %33,98'ine tek başına neden olmaktadır. Onu 4.682 milyon ton toplam CO₂ emisyon miktarı ile ABD takip etmekte ve dünya emisyonlarının %12'sini oluşturmaktadır. Hindistan ve Rusya'nın da toplam emisyon miktarları dünya genelindeki diğer ülkelere göre oldukça yüksektir. Dünya geneli toplam emisyonu en fazla olan diğer ülkeler ise Japonya, İran, Endonezya, Suudi Arabistan, Almanya ve Kanada'dır. Kişi başına CO₂ emisyonu değerlerine bakıldığında ise nüfustan kaynaklı olarak toplam emisyon değerleri yüksek olan ülkelerin daha düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, özellikle sanayileşmiş ülkelerin CO₂ salınımı açısından çok büyük bir etki yarattığını; bazı gelişmemiş ülkelerde ise özellikle fosil yakıt bağımlılığı, yenilenebilir enerji kullanımının sınırlı olması ve sürdürülebilir kalkınma politikalarının yetersizliğinden dolayı yüksek CO₂ seviyelerine sahip olduğunu göstermektedir. Tablo 2.3'te çalışmada incelenen RECAI kapsamındaki 32 ülkenin 2023 yılına ait toplam CO₂ emisyonları, kişi başına CO₂ emisyon miktarları ve dünya toplam emisyonları içerisindeki oranları sunulmuştur.

**Tablo 2.3. Çalışmada Yer Alan RECAI Ülkelerinde CO₂ Emisyon Değerleri
(2023)**

Ülkeler	Toplam CO ₂ Emisyon Miktarı (milyon ton)	Kişi Başına CO ₂ Emisyon Miktarı (ton/kişi)	Dünya Toplam Emisyonlarındaki Payı (%)
ABD	4.682	13,80	%12,00
Almanya	583	7,06	%1,49
Arjantin	184	3,93	%0,47
Avustralya	374	14,20	%0,96
Belçika	84	7,18	%0,22
Birleşik Krallık	302	4,42	%0,77
Brezilya	480	2,20	%1,23
Çin	13.260	9,24	%33,98
Danimarka	27	4,56	%0,07
Endonezya	675	2,41	%1,73
Fas	70	1,82	%0,18
Finlandiya	32	5,73	%0,08
Fransa	*	4,25	*
Güney Afrika	397	6,56	%1,02
Güney Kore	574	11,00	%1,47
Hindistan	2.955	2,07	%7,57
Hollanda	123	7,09	%0,31
İrlanda	32	6,50	%0,08
İspanya	217	4,68	%0,56
İsrail	61	4,13	%0,16
İsveç	35	3,43	%0,09
İsviçre	34	3,87	%0,09
İtalya	61	5,19	%0,16
Japonya	945	7,54	%2,42
Kanada	575	14,90	%1,47
Macaristan	44	4,61	%0,11
Meksika	487	3,52	%1,25
Mısır	1	2,31	*
Norveç	44	7,86	%0,11
Şili	84	4,45	%0,22
Türkiye	438	5,13	%1,12
Yunanistan	52	4,69	%0,13
*ilgili yerdeki veriler mevcut değildir.			

Kaynak: World Population Review (t.y.-a).

Tablo 2.3'e göre, Çin ve ABD toplam emisyon açısından tüm ülkelerden daha fazla miktarlarda CO₂ emisyonlarına sahiptir. Onları Hindistan ve Japonya takip etmektedirler. Buna karşılık Mısır, Danimarka ve Finlandiya ülkelerinin toplam emisyon miktarları diğer ülkelere kıyasla oldukça düşüktür. Kişi başına CO₂ emisyonlarına bakıldığında ise nüfusun etkisi bazı ülkelerde (ABD, Çin, Hindistan, Brezilya, Endonezya ve Meksika vd.) belirgin bir şekilde görülmektedir. Toplam CO₂ emisyonu yüksek olan ülkelerin çoğunda nüfus etkisiyle kişi başına CO₂ emisyon miktarının düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca bu ülkelerin kişi başına CO₂ emisyon miktarlarının toplam CO₂ emisyonları düşük olan ülkelere kıyasla (İsveç, İsviçre, Belçika ve Danimarka vd.) daha da düşük olduğu görülmektedir.

Karbon emisyonlarının başlıca sebepleri enerji kullanımı, ormansızlaşma ve tarımsal faaliyetlerdir (Türkeş, 2000:1). Bu nedenle emisyonların doğru biçimde değerlendirilebilmesi için aşağıda öncelikle enerji kavramı, enerji kaynaklarının türleri ele alınmaktadır. Böylece emisyon salınımının hangi enerji kaynaklarından kaynaklandığı ve emisyonlarla mücadelede hangi enerji kaynaklarının daha etkili olabileceği daha net bir biçimde anlaşılabilecektir. Ardından, ormansızlaşmanın ve tarımsal faaliyetlerin CO₂ emisyonları üzerindeki etkileri açıklanarak, farklı kaynakların küresel emisyonlara katkısının daha bütüncül bir şekilde değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

2.1.1. Enerji Kaynaklı CO₂ Emisyonu Salınımı

Enerji kavramı, kökeni Yunancaya dayanan ve iş yapabilme yetisi anlamına gelen bir olgudur. Fiziksel olarak ölçülebilen bu büyüklük, yalnızca bilimsel bir kavram olmakla kalmayıp aynı zamanda ekonomik faaliyetlerin temel unsurlarından birisidir. Günümüzde enerji hem stratejik önemi hem de üretim süreçlerindeki vazgeçilmez rolü nedeniyle ülkeler arası politikaların ve çatışmaların merkezinde yer almaktadır. Enerji olmadan, üretimden ve ekonomik sürdürülebilirlikten söz edilebilmesi mümkün değildir (Bahar, 2005: 35). Bu nedenle, enerji talebinin artış göstermesi, CO₂ emisyonlarında da paralel bir yükselişi kaçınılmaz kılmakta ve çevresel sorunları ile iklim değişikliği gibi küresel problemleri de beraberinde getirmektedir.

Enerji sektöründe ortaya çıkan CO₂ emisyonları küresel ısınmanın en önemli nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Özellikle termik santraller ve etanol

gibi biyoyakıt tesisleri bu gazın salımında başlıca kaynaklar arasında yer almaktadır (Vaz vd., 2022: 1). Başka bir ifadeyle, enerji üretiminde fosil yakıtların kullanımı CO₂ emisyonlarının en büyük kaynağını oluşturmaktadır. Enerji tüketimi arttıkça CO₂ salımı artmakta, bu durum da çevresel sorunlara ve iklim değişikliğine yol açmaktadır (Özcan ve Öztürk, 2015: 1; Çoban ve Kılınç, 2016: 196-197). 2023 yılı itibarıyla, küresel ölçekte fosil yakıt kaynaklı birincil enerji tüketimi yaklaşık 140.231 terawatt-saat (TWh) olarak gerçekleşmiştir (Our World in Data, 2024d). Bu değer, fosil yakıt tüketiminin oldukça yüksek seviyelerde seyrettiğini ve bu durumun küresel CO₂ emisyonlarının artışıdaki başlıca etkenlerden biri olmaya devam ettiğini göstermektedir.

Bunun yanısıra enerji talebini sosyoekonomik faktörlerin de etkilediğini göz ardı etmemek gerekir. Hızla artan dünya nüfusu, kentleşme oranındaki yükseliş, yaşam standartlarındaki iyileşme, sanayileşmenin hız kazanması ve teknolojik gelişmelerle birlikte makine ve araç kullanımındaki çeşitlilik yatmaktadır. Tüm bu etkenler enerji sektörünü günümüzde kritik bir noktaya taşımaktadır. Artan enerji talebi büyük ölçüde fosil yakıtlarla karşılanmakta, bu da CO₂ salımlarının artmasına ve çevresel tahribatın derinleşmesine yol açmaktadır. Dolayısıyla hem enerjiye olan bağımlılığın devam etmesi hem de sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşma gerekliliği enerji üretim ve tüketim politikalarının çevresel boyutunu daha da önemli hâle getirmektedir. Bu bağlamda, CO₂ emisyonları açısından kritik bir rol oynayan enerji kaynakları aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

Enerji Kaynakları

Enerji; ısı, ışınım, mekanik, kimyasal, nükleer, elektriksel, yerçekimsel, manyetik, kinetik ve potansiyel gibi farklı biçimlerde ortaya çıkabilir (Aydoğdu, 2021: 53).

Koç vd.'ne (2018) göre enerji kaynakları hem kullanım biçimlerine hem de dönüştürülebilirlik özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Kullanım biçimlerine göre bakıldığında, enerji kaynakları yenilenemez ve yenilenebilir olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Dönüştürülebilirlik açısından ise enerji kaynakları birincil ve ikincil olarak sınıflandırılmaktadır. Fosil yakıtlar olan kömür, petrol ve doğalgaz ile birlikte nükleer hammaddeler olarak kabul edilen uranyum ve toryum yenilenemez kaynaklar arasında yer alırken; güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle, jeotermal, hidrojen ve

dalga-gelgit gibi kaynaklar ise doğada kendini sürekli yenileyebilen yani tükenmeyen enerji kaynakları olarak tanımlanmaktadır.

Enerji kaynakları dönüştürülmeden önceki ham hâllerıyla “birincil enerji kaynakları” olarak adlandırılmaktadır. Petrol, kömür, doğal gaz, nükleer enerji, hidrolik güç, biyokütle, güneş, rüzgâr ve gelgit enerjileri bu grubun içerisinde yer almaktadır. Bu kaynakların çeşitli fiziksel ya da kimyasal işlemlerle dönüştürülmesi sonucunda elde edilen formlar ise “ikincil enerji” olarak tanımlanmakta ve elektrik, benzin, motorin, LPG, kok kömürü gibi enerji türleri bu gruba örnektir (Koç ve Kaya, 2015: 37; Sawhney, 2012: 3).

2023 yılında küresel birincil enerji tüketimi toplamda yaklaşık 183.230 TWh olarak gerçekleşmiştir. Bu toplam içerisinde 54.564 TWh ile petrol, 45.565 TWh ile kömür ve 40.102 TWh ile doğal gaz yer almaktadır. Nükleer enerji 6.824 TWh, hidroelektrik 11.014 TWh, rüzgâr 6.040 TWh, güneş 4.264 TWh, biyoyakıtlar 1.318 TWh, diğer yenilenebilir kaynaklar (jeotermal, dalga, gel-git) 2.428 TWh ve geleneksel biyokütle kullanımı ise 11.111 TWh olarak gerçekleşmiştir (Our World in Data, 2024e). Bu veriler incelendiğinde fosil yakıtların (petrol, kömür ve doğal gaz) toplamda yaklaşık 140.231 TWh ile küresel birincil enerji tüketiminin yaklaşık %76,5’ini oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bu oran dünya enerji sisteminin büyük ölçüde fosil yakıt temelli olduğunu göstermekte; buna karşılık, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve nükleer enerjinin toplam tüketimdeki payının sınırlı kaldığını göstermektedir.

Enerji kaynaklı karbon emisyonlarının artışında en önemli etken, fosil yakıt temelli enerji üretiminin yaygınlığıdır (Rahman vd., 2024: 1). Bu doğrultuda, aşağıda enerji kaynaklarının çevresel sürdürülebilirliklerini açıklamak adına enerji türleri kullanım özelliklerine göre yenilenebilir ve yenilenemez olmak üzere iki ana başlık altında sınıflandırılarak açıklanmıştır.

Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Çevreye zarar veren fosil yakıtların kullanımıyla ilgili endişelerin artması yenilenebilir enerji kaynaklarının daha fazla tercih edilmesine yol açmıştır. Bu kaynaklar fosil yakıtların yol açtığı hava kirliliğine karşı etkili bir çözüm olarak değerlendirilmektedir (San Cristóbal, 2011: 2742). Yenilenebilir enerji kaynakları rüzgâr, güneş, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle enerjilerini kapsamaktadır

(Ellabban vd., 2014: 754). Özellikle fosil yakıtlarla karşılanan enerji tüketimi artış gösterdiğinde, sera gazı emisyonları doğrudan artmaktadır. Gerçekleşen artışın önüne geçilmesinin yolu ise enerji tüketiminde yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının artırılmasıyla mümkündür (Perry vd., 2008:1489). Ülkelerin fosil yakıtların olumsuz etkileri nedeniyle daha güvenli, temiz ve tükenmeyen yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep de bu doğrultuda artış göstermiştir (Ustaoglu, 2022: 281). Yenilenebilir enerji kullanımının artırılması için uygulamada her türlü çalışma ve desteklerin sürmesine rağmen yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılmasının önünde birçok engel de mevcuttur. Tablo 2.4’te yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılmasına engel olan faktörler sunulmuştur (Olabi ve Abdelkareem, 2022: 2).

Tablo 2.4. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yaygınlaştırılmasına Engel Olan Faktörler

Ekonomik ve Finansal Faktörler	• Sermaye yatırımı • Proje finansı ve ekonomisi • Enerji maliyeti • Pazar rekabeti ve başarısızlıkları • Vergiler, harçlar, gümrük mevzuatları
Teknik Faktörler	• Yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcudiyeti
Sosyal ve Çevresel Faktörler	• Farkındalık ve bilgi • Kültürel ve davranışsal faktörler • Genel kabul görme • Son kullanıcı tutumları • Çevresel etkiler
Mevzuat ve Politik Faktörler	• Politika ve düzenlemelerin etkinliği • Teşvik mekanizmaları • Yabancı yatırımları düzenleyen yasa ve yönetmelikler • Hükümet enerji sübvansiyonları
Kurumsal ve İdari Faktörler	• Kurumsal kapasite • Paydaşların katılımı • Bürokratik lisanslama ve prosedürler

Kaynak: Olabi ve Abdelkareem (2022: 2).

Tablo 2.4’e göre, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması noktasında, ekonomik ve finansal faktörler, teknik imkanlar, sosyal ve çevresel bilinç, mevzuat ve politika düzenlemeleri ile kurumsal ve idari kapasite önemli engelleri teşkil etmektedir. Sermaye yatırımı, proje finansmanı, enerji maliyeti ve pazar rekabeti

gibi ekonomik unsurların yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynaklarının yeterli düzeyde bulunabilirliği teknik açıdan belirleyicidir. Ayrıca toplumsal farkındalık, kültürel ve davranışsal tutumlar, genel kabul görme ve çevresel etkiler sosyal ve çevresel boyutta rol oynamaktadır. Mevzuat ve politika alanında etkin düzenlemeler, teşvikler, yabancı yatırım yasaları ve hükümet sübvansiyonları yaygınlaştırma sürecini desteklemektedir. Son olarak, kurumsal kapasite, paydaş katılımı ve bürokratik lisanslama süreçleri idari engeller arasında yer almaktadır. Bu faktörler yenilenebilir enerji kaynaklarının daha geniş ölçekte kullanılabilmesi için çözülmesi gereken temel sorunları ortaya koymaktadır.

2024 yılı sonunda, dünya genelindeki yenilenebilir enerji kurulu gücü 4.448 GW (gigawatt) seviyesine ulaşmıştır. Bu kapasitenin büyük çoğunluğunu 1.865 GW ile güneş enerjisi oluştururken, hidroelektrik ve rüzgâr enerjisi sırasıyla 1.283 GW ve 1.133 GW ile önemli paylara sahiptir. Ayrıca biyoyakıt, jeotermal ve deniz enerjisi gibi diğer kaynaklar da bu kapasiteye katkı sağlamaktadır. 2024'te yenilenebilir enerji kapasitesi toplamda 585 GW artarak %15,1 büyümüş; bu büyümenin yaklaşık %75'i ise 452 GW'lık artışla güneş enerjisinden kaynaklanmıştır. Rüzgâr enerjisi 113 GW'lık bir artışla %11,1 oranında büyümüştür. Yenilenebilir hidroelektrik kapasitesi 15 GW artarak %1,2; biyoyakıt 4,6 GW artarak %3,2; jeotermal enerji ise 0,4 GW artarak %2,5 oranında artış göstermiştir. Güneş ve rüzgâr enerjisi 2024 yılında yenilenebilir enerji kapasitesindeki net büyümenin %96,6'sını oluşturarak sektörün büyümesinde öncü konumdadır. 2024 yılı yenilenebilir enerji kurulu gücünde hem miktar hem de oransal olarak şimdiye kadarki en hızlı büyümenin kaydedildiği yıl olmuştur (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı [IRENA], 2025a). Bu durum, küresel enerji dönüşümünde yenilenebilir kaynakların hızla artan önemini ve fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması yönündeki kararlılığı göstermektedir. Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisindeki büyüme, temiz enerji üretiminin gelecekteki ana dinamikleri arasında yer aldığını ortaya koymaktadır. Bu gelişmeler iklim değişikliğiyle mücadelede ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için kritik fırsatlar sunmakta, enerji sektöründe daha çevreci ve verimli politikaların hayata geçirilmesini zorunlu kılmaktadır. Tablo 2.5'te 2020-2024 yılları arasında yenilenebilir enerji kurulu kapasiteleri dünya genelinde ve bölgelere göre megavat (MW) cinsinden sunulmuştur.

**Tablo 2.5. Dünya ve Bölgelere Göre Yenilenebilir Enerji Kurulu Kapasitesi
(2020-2024, MW)**

	2020	2021	2022	2023	2024
Dünya	2.812.981	3.075.931	3.378.790	3.862.881	4.448.051
Afrika	53.679	55.580	59.291	62.672	66.898
Asya	1.301.391	1.456.183	1.631.015	1.960.961	2.382.468
Avrasya	106.876	112.367	115.822	122.311	130.624
Avrupa	606.045	647.049	705.139	778.511	848.627
Avrupa Birliği	476.295	512.086	563.449	631.099	703.417
Güney Amerika	233.174	247.257	267.923	290.636	313.162
Kuzey Amerika	424.732	462.211	492.473	527.110	573.005
Okyanusya	47.038	52.345	58.781	65.108	73.777
Orta Amerika ve Karayipler	16.428	17.063	17.612	18.669	19.272
Orta Asya	23.618	25.876	30.733	36.901	40.219

Kaynak: IRENA (2025b).

Tablo 2.5'e göre, 2020-2024 yılları arasında dünya genelinde yenilenebilir enerji kurulu kapasitesi 2.812.981 MW'den 4.448.051 MW'ye çıkarak yaklaşık %58,1 oranında büyümüştür. Bu artışa en fazla katkı sağlayan bölge Asya olmuştur; Asya'da kurulu kapasite 1.301.391 MW'den 2.382.468 MW'ye çıkmıştır. Avrupa'da 606.045 MW olan kapasite, 848.627 MW'ye yükselmiş; AB özelinde ise 476.295 MW'den 703.417 MW'ye ulaşmıştır. Kuzey Amerika'nın kapasitesi 424.732 MW'den 573.005 MW'ye, Güney Amerika'nınki ise 233.174 MW'den 313.162 MW'ye çıkmıştır. Afrika bölgesinde kapasite artışı 53.679 MW'den 66.898 MW'ye, Orta Amerika ve Karayipler'de ise 16.428 MW'den 19.272 MW'ye olmuştur. Avrasya 106.876 MW'den 130.624 MW'ye, Orta Asya 23.618 MW'den 40.219 MW'ye, Okyanusya ise 47.038 MW'den 73.777 MW'ye kapasiteye ulaşmıştır. Tablodaki tüm bölgelerde yıllar içerisinde artış eğiliminin devam ettiği görülmektedir. Bu durum yenilenebilir enerji yatırımlarının küresel ölçekte hız kazandığını ve tüm kıtalarda enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği için önemli gelişmelerin yaşandığını göstermektedir. Tablo 2.6'da 2020-2024 yılları arasında dünya genelinde ve bölgesel bazda yenilenebilir enerjinin elektrik üretim kapasitesi içindeki payı sunulmuştur.

Tablo 2.6. Dünya ve Bölgelere Göre Yenilenebilir Enerjinin Elektrik Üretim Kapasitesindeki Payı (2020-2024, %)

	2020	2021	2022	2023	2024
Dünya	36,6	38,4	40,3	43,1	46,4
Afrika	22,3	22,6	23,5	24,4	25,4
Asya	35,7	37,7	39,7	43,4	47,5
Avrasya	29,9	30,9	31,4	32,5	34,2
Avrupa	49,7	51,6	54,0	56,6	60,2
Avrupa Birliği	77,8	79,1	80,9	82,7	84,1
Güney Amerika	67,5	68,4	70,5	71,6	73,0
Kuzey Amerika	30,6	32,3	33,7	35,2	37,3
Okyanusya	44,9	47,4	50,2	53,5	56,0
Orta Amerika ve Karayipler	35,7	37,2	38,1	38,7	38,7
Orta Asya	7,1	7,6	8,8	10,1	10,8

Kaynak: IRENA (2025b).

Tablo 2.6'ya göre, 2020-2024 yılları arasında yenilenebilir enerjinin elektrik üretim kapasitesi içindeki payı tüm bölgelerde artış göstermiştir. En yüksek paya sahip olan bölge AB'de 2020'de %77,8 iken; 2024'te bu oran %84,1'e yükselmiştir. Güney Amerika da yüksek paya sahip bölgeler arasında yer almakta olup, 2020'de %67,5 olan oran 2024'te %73,0'a çıkmıştır. Okyanusya bölgesinde ise 2020'de %44,9 olan pay, 2024'te %56,0'a ulaşarak dikkat çekici bir artış sergilemiştir. Buna karşın en düşük yenilenebilir enerji payı Orta Asya bölgesindedir; bu bölgedeki oran 2020'de %7,1 iken 2024'te %10,8'e yükselmiştir. Afrika ve Orta Amerika-Karayipler bölgeleri ise sırasıyla %22,3'ten %25,4'e ve %35,7'den %38,7'ye artış göstermiştir. Dünya genelinde yenilenebilir enerjinin elektrik kapasitesindeki payı ise 2020'de %36,6'dan 2024'te %46,4'e çıkarak yaklaşık %10'luk önemli bir büyüme kaydetmiştir. Bu veriler özellikle AB ve Güney Amerika gibi bölgelerde yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki baskın rolünü ortaya koyarken, Orta Asya gibi bölgelerde ise yenilenebilir enerji payının hala nispeten düşük olduğunu göstermektedir. Tablo 2.7'de 2023 yılı dünya genelinde en yüksek yenilenebilir enerji üretimine (TWh) sahip olan ilk 10 ülke sunulmuştur.

Tablo 2.7. Yenilenebilir Enerji Üretimi En Yüksek 10 Ülke (2023, TWh)

Ülkeler	Toplam Yenilenebilir Enerji Üretimi (TWh)
Çin	2.894,1
ABD	973,7
Brezilya	631,5
Kanada	421,2
Hindistan	382,0
Almanya	272,4
Japonya	223,5
Rusya	209,1
Norveç	150,9
İspanya	142,0

Kaynak: World Population Review (t.y.-b).

Tablo 2.7'ye göre, 2023 yılında toplam yenilenebilir enerji üretimi en yüksek olan ülke Çin olup onu sırasıyla ABD, Brezilya, Kanada, Hindistan takip etmektedir. Diğer ülkeler bu beş ülkeye kıyasla daha düşük üretim sağlamış olmakla birlikte, dünya genelinde en yüksek yenilenebilir enerji üretimine sahip olan ülkeler sıralamasında ilk 10'da yer almaktadırlar. Burada dikkat çeken bir diğer husus; Çin, ABD, Brezilya ve Hindistan'ın toplam CO₂ emisyonları açısından da en yüksek değerlere sahip olan ülkeler olmalarıdır. Bu durum toplam CO₂ emisyon değerleri en yüksek olan ülkelerin yenilenebilir enerji üretimine yoğunlaştıklarını, fakat yüksek emisyon değerlerine bakıldığında fosil yakıt bağımlılığından kurtulamadıklarını ortaya koymaktadır. Tablo 2.8'de çalışmada yer alan RECAI kapsamındaki 32 ülkenin 2023 yılı toplam yenilenebilir enerji üretim miktarları sunulmuştur.

Tablo 2.8. Çalışmada Yer Alan RECAI Ülkelerinde Toplam Yenilenebilir Enerji Üretim Miktarları (2023, Ton)

Ülkeler	Toplam CO ₂ Emisyon Miktarı (Milyon ton)	Ülkeler	Toplam CO ₂ Emisyon Miktarı (Milyon ton)
ABD	973,7	Hollanda	58,2
Almanya	272,4	İrlanda	13,9
Arjantin	49,9	İspanya	142,0
Avustralya	95,2	İsrail	8,1
Belçika	26,9	İsveç	114,8
Birleşik Krallık	135,0	İsviçre	45,2
Brezilya	631,5	İtalya	114,0
Çin	2.894,1	Japonya	223,5
Danimarka	29,6	Kanada	421,2
Endonezya	65,2	Macaristan	8,9
Fas	8,8	Meksika	76,3
Finlandiya	41,9	Mısır	24,8
Fransa	139,8	Norveç	150,9
Güney Afrika	20,1	Şili	58,0
Güney Kore	55,7	Türkiye	137,9
Hindistan	382,0	Yunanistan	24,2

Kaynak: World Population Review (t.y.-b).

Tablo 2.8'e göre, en yüksek toplam yenilenebilir enerji üretim miktarına (2.894,1 milyon TWh) sahip ülke Çin'dir. Çin'i sırasıyla ABD, Brezilya, Kanada ve Hindistan takip etmektedir. Diğer yandan, İsrail, Macaristan, Güney Afrika ve Fas'ın toplam yenilenebilir enerji üretim miktarları ise oldukça düşüktür. Bu durum ülkelerin enerji politikalarının ve sürdürülebilir enerjiye geçiş düzeylerinin farklı olduğunu göstermektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının türleri ise aşağıda "hidroelektrik, güneş, rüzgâr, biyokütle ve jeotermal enerji" sırasıyla açıklanarak sunulmuştur.

Hidroelektrik Enerjisi

Hidroelektrik enerji, suyun potansiyel enerjisinin türbinler aracılığıyla kinetik enerjiye dönüştürülerek elektrik üretiminde kullanılan, fosil yakıt kullanımına bağlı olmadığı için çevre dostu, temiz bir enerji çeşididir. Suyun doğal döngü ile sürekli yenilenmesi sayesinde yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır.

Barajlarda suyun depolanması, gerektiğinde enerji üretimini artırmaya veya azaltmaya olanak tanıyarak elektrik arzının daha dengeli ve kontrollü olmasını sağlamaktadır (Singh vd., 2014: 945; Dirik vd., 2023: 32-33). Hidroelektrik enerjisinin tarihi 19. yüzyıla kadar uzanmaktadır. İlk hidroelektrik santrali 1879 yılında Niagara Şelaleleri'nde kurulmuştur. Bu santral kısa süre sonra şehre elektrik sağlayarak sokak lambalarının aydınlatılmasında kullanılmıştır. Ardından 1882 yılında ABD'nin Wisconsin eyaletinde Appleton şehrinde dünyanın ilk ticari hidroelektrik santrali faaliyete geçirilmiştir (Bagher vd., 2015: 17). Zamanla gelişerek yaygınlaşan hidroelektrik enerjisi, günümüzde temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutmaktadır.

Hidroelektrik enerjisi başlangıçta yüksek yatırım gerektirse de işletme maliyetleri düşüktür ve yakıt ihtiyacı yoktur. Yenilenebilir enerji kullanımının artması iklim değişikliğiyle mücadelede önem taşıırken, enerji talebindeki artış ve hidroelektrik üretiminin azalması bu enerji kaynağının sürdürülebilirliğini tehdit edebilir (Alashan vd., 2016: 1511). Hidroelektrik enerjisinin kullanımı için hidroelektrik santraller (HES) kurulmuştur. Bu santraller, güçlerine göre büyük ve küçük ölçekli olmak üzere ikiye ayrılır. Büyük ölçekli santrallerin inşası yüksek maliyetli ve uzun sürelidir; ayrıca su depolama alanlarının çevredeki yaşamı olumsuz etkileyebilme riski bulunmaktadır. Buna karşılık küçük ölçekli HES'lerde baraj inşasına gerek olmadığı için maliyet ve inşaat süresi daha kısadır ve çevresel zararları da daha azdır (Villarreal vd., 2018; Özdemir vd., 2020: 70). Hidroelektrik enerji, sürdürülebilir bir kaynak olmakla birlikte, azalan üretim kapasitesi ve artan talep nedeniyle gelecekteki rolü risk altındadır. Bu nedenle çevresel etkisi düşük ve ekonomik olan küçük ölçekli HES'lerin desteklenmesi enerji arzının sürdürülebilirliği açısından önemli bir adım olabilir.

Hidroelektrik enerji, suyun akışının kolayca kontrol edilmesi sayesinde elektrik üretiminin talebe göre ayarlanabilmesi, çevreye zararlı gaz salınımının olmaması ve suyun barajlarda depolanarak enerji arzının dengelenebilmesi gibi önemli avantajlara sahiptir. Uzun ömürlü santraller sabit üretim sağlar, sulama ve turizm gibi alanlara katkıda bulunur. Fosil yakıt ve nükleer enerjiye göre daha güvenli, atık oluşturmeyen ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Ancak inşaat maliyetlerinin yüksek olması, doğal yaşam alanlarının sular altında kalması, yerel halkın tahliyesi, sınır komşuları arasında su akışıyla ilgili anlaşmazlıklar ve ekosistem üzerindeki olumsuz etkiler hidroelektriğin başlıca dezavantajlarıdır. Ayrıca kuraklıklar üretimi kısıtlayabilir ve

yeni rezervlerinin sınırlı olması projeleri zorlaştırmaktadır. Bu sebeplerle hidroelektrik enerji çevresel ve sosyal zorluklar barındırmaktadır (Kirmani vd., 2021: 716- 717; Albayrak ve Turanlı, 2022: 69- 70). Tablo 2.9’da 2015-2024 yılları arasında dünyaki toplam hidroelektrik kurulu elektrik kapasitesi (MW cinsinden) sunulmuştur.

**Tablo 2.9. Dünya Toplam Hidroelektrik Kurulu Elektrik Kapasitesi
(2015-2024, MW)**

Yıllar	Toplam Kurulu Elektrik Kapasitesi (MW)
2015	1.211.245
2016	1.253.269
2017	1.274.605
2018	1.294.120
2019	1.310.606
2020	1.332.363
2021	1.359.536
2022	1.393.299
2023	1.409.865
2024	1.425.374

Kaynak: IRENA (2025b).

Tablo 2.9’a göre, 2015 yılındaki 1.211.245 MW olan dünya toplam hidroelektrik kurulu elektrik kapasitesi, 2024 yılında 1.425.374 MW’a ulaşarak 214.129 MW artış göstermiştir. Hidroelektrik enerji kurulu elektrik kapasitesinin son yıllarda sürekli artış gösterdiği görülmektedir.

Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneşin merkezinde gerçekleşen nükleer füzyon süreciyle ortaya çıkan ve uzaya ışıma yoluyla yayılan enerjidir. Bu enerji, dünyaya ulaşarak ısı ve ışık sağlar; gezegenimizdeki tüm fiziksel ve biyolojik sistemlerin temel enerji kaynağıdır (Kılıç, 2015: 30). Güneş dünya için sınırsız ve ücretsiz bir enerjidir. Günümüzde bu enerjiyi elektrik üretiminde kullanmak amacıyla çeşitli modern teknolojiler geliştirilmektedir. Bu yöntemler, güvenilirliği kanıtlanmış ve fosil yakıt dışındaki geleneksel enerji kaynaklarına alternatif olarak dünya genelinde yaygın biçimde uygulanan yenilenebilir enerji çözümleridir (Kabir vd., 2018: 894). Güneş enerjisi, çevreye zarar vermeyen ve küresel ısınmaya neden olmayan temiz bir enerji kaynağıdır. Güneşin sağladığı yüksek enerji potansiyeli, onu fosil yakıtların yerine geçebilecek önemli bir alternatif haline getirmiştir. Fosil yakıtların tükenme

riski ve çevresel etkileri nedeniyle güneş enerjisine olan küresel ilgi giderek artmaktadır. Aynı zamanda bu tür enerji kaynakları yaşam kalitesini yükseltmede önemli rol oynamaktadır (Solangi vd., 2011: 2150). Güneş enerjisi, çevreye zarar vermeyen yapısıyla karbon salımını azaltırken, doğal kaynakları koruma ve hava kalitesini artırma gibi önemli çevresel faydalar sunmaktadır. Aynı zamanda enerji bağımsızlığı sağlar, istihdam yaratır ve kırsal alanların kalkınmasına katkıda bulunarak sosyo-ekonomik açıdan da önemli avantajlar sağlamaktadır (Tsoutsos vd., 2005: 289). Buna göre, güneş enerjisi sadece çevre dostu ve sürdürülebilir bir kaynak değil; aynı zamanda fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak enerji arzını güvence altına alan, ekonomik kalkınmaya katkı sağlayan ve toplumsal refahı artıran çok yönlü bir enerji kaynağıdır. Tablo 2.10'da 2015-2024 yılları arasında dünya toplam güneş enerjisi kurulu elektrik kapasitesini (MW cinsinden) sunulmuştur.

Tablo 2.10. Dünya Toplam Güneş Enerjisi Kurulu Elektrik Kapasitesi (2015-2024 MW)

Yıllar	Güneş Enerjisi Toplam Kurulu Elektrik Kapasitesi (MW)
2015	227.236
2016	299.167
2017	394.312
2018	490.289
2019	592.654
2020	723.638
2021	866.830
2022	1.060.522
2023	1.413.548
2024	1.865.490

Kaynak: IRENA (2025b).

Tablo 2.10'a göre güneş enerjisi kurulu elektrik kapasitesi, 2015 yılında 227.236 MW seviyesindeyken, 2024 yılında 1.865.490 MW'a ulaşarak dikkat çekici bir büyüme göstermiştir. Bu artış, dünya genelinde güneş enerjisine olan ilginin hızla yükseldiğini ve bu kaynağın enerji üretiminde giderek daha önemli bir yer edindiğini ortaya koymaktadır. Özellikle son beş yılda yaşanan hızlı kapasite artışı bu alandaki yatırımların ve teknolojik gelişmelerin hız kazandığını göstermektedir.

Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisi, atmosferdeki hava akımlarının taşıdığı kinetik enerjiden elde edilen bir yenilenebilir bir enerji türüdür (Elibüyük ve Üçgöl, 2014: 2). Bu enerji kaynağı güneşin yeryüzünü farklı ısıtması sonucu oluşan basınç farklarından kaynaklanan hava hareketlerinden elde edilir. Rüzgâr mekanik ya da elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Mekanik enerji özellikle sulama gibi tarımsal uygulamalarda kullanılırken, elektrik üretimi için Rüzgâr Enerjisi Santralleri (RES) tercih edilmektedir (Koç ve Kaya, 2015: 43). Rüzgâr enerjisi, fosil yakıtların tükenme riski ve çevresel sorunlar nedeniyle günümüzde önemli bir alternatif enerji kaynağı haline gelmiştir. Teknolojik gelişmeler sayesinde maliyetlerin düşmesi, bu enerjiyi daha ulaşılabilir kılmış; birçok ülke de bu alandaki yatırımları devlet politikası olarak desteklemeye başlamıştır (Aydın, 2013: 31). Tablo 2.11’de 2015-2024 yılları arasında dünya genelinde rüzgâr enerjisinin toplam kurulu kapasitesi (MW) cinsinden gösterilmiştir.

Tablo 2.11. Dünya Toplam Rüzgâr Enerjisi Toplam Kurulu Elektrik Kapasitesi (2015-2024, MW)

Yıllar	Rüzgâr Enerjisi Toplam Kurulu Elektrik Kapasitesi (MW)
2015	416.579
2016	467.533
2017	515.218
2018	563.590
2019	622.938
2020	733.780
2021	824.380
2022	903.171
2023	1.019.603
2024	1.132.837

Kaynak: IRENA (2025b).

Tablo 2.11’e göre, 2015 yılından 2024 yılına kadar dünya genelinde rüzgâr enerjisinin toplam kurulu kapasitesinde istikrarlı bir artış görülmektedir. 2010 yılında 416.579 MW olan kapasite, 2024 yılında 1.132.837 MW olmuştur ve yaklaşık 3 katı bir artış sergilemiştir. Bu artış, küresel ölçekte rüzgâr enerjisine olan yatırımın hızla arttığını ve ülkelerin yenilenebilir enerjiye yöneliminde rüzgârın önemli bir paya sahip olduğunu göstermektedir. 2015 yılında imzalanan Paris Anlaşması’nın ardından, küresel rüzgâr enerjisi kurulu gücünde dikkat çekici bir artış yaşandığı görülmektedir.

Bu gelişmeler, rüzgâr enerjisinin hem iklim değişikliğiyle mücadelede hem de sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleştirilmesinde stratejik bir araç olarak değerlendirildiğini ortaya koymaktadır.

Biyokütle Enerjisi

Biyokütle, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyolojik bir enerji kaynağıdır. Artan enerji ihtiyacına cevap verebilen biyokütle, işlenerek katı, sıvı ve gaz hâlinde farklı türde enerji ürünlerine dönüştürülebilmektedir. Tarımsal atıklar, orman artıkları ve enerji amaçlı yetiştirilen bitkiler gibi çeşitli kaynaklardan elde edilmektedir. Depolanabilirliği ve çeşitli yöntemlerle enerjiye dönüştürülebilmesi, diğer yenilenebilir kaynaklara göre önemli avantajları bünyesinde barındırmaktadır (Tilki ve Çiçek, 2003: 34; Şenol vd., 2017: 81- 82). Biyokütle enerji kaynakları sahip olduğu avantajlara rağmen bazı çevresel ve sosyal dezavantajları da içermektedir. Tarım arazilerinin enerji üretimi amacıyla yoğun kullanımı doğal alanların kaybına, su kaynaklarının kirlenmesine ve gıda üretimiyle rekabete yol açabilmektedir (Field vd., 2008: 65). Yani biyokütle enerjisi doğal dengeyi korumak adına dikkatli kullanılması gereken bir enerji türüdür. Enerji üretimiyle birlikte gelen çevresel etkiler göz ardı edilmeden bu kaynakların sürdürülebilir bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Tablo 2.12’de 2015-2024 yılları arasında dünya toplam biyokütle enerjisi kurulu elektrik kapasitesini (MW cinsinden) sunulmuştur.

**Tablo 2.12. Dünya Toplam Biyokütle Enerjisi Kurulu Elektrik Kapasitesi
(2015-2024, MW)**

Yıllar	Biyokütle Enerjisi Toplam Kurulu Elektrik Kapasitesi (MW)
2015	95.599
2016	104.042
2017	109.872
2018	116.968
2019	122.903
2020	130.863
2021	137.337
2022	143.155
2023	146.145
2024	150.763

Kaynak: IRENA (2025b).

Tablo 2.12'ye göre biyokütle enerji kapasitesi sürekli bir artış sergilemektedir. 2015 yılında 95.599 MW olan kurulu kapasite 2024'te 150.763 MW olarak gerçekleşmiş ve kayda değer bir büyüme göstermiştir. Bu eğilim, ülkelerin enerji çeşitliliğini artırma ve fosil yakıtlardan uzaklaşma çabalarının göstergesi olarak biyokütle enerji kapasitesinin artırılması için yapılan yatırım ve politika desteklerinin yansımasıdır.

Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerinde doğal olarak oluşan ısıнын, yeraltı suyu aracılığıyla yüzeye ulaşması sonucu elde edilen bir enerji biçimidir. Bu ısıya doğal yarıklar, fay hatları veya açılan sondajlarla erişmek mümkündür. Sürekli ve kesintisiz enerji sağlayabilmesi nedeniyle hem ısı hem de elektrik üretiminde kullanılabilen bu kaynak, ticari ölçekte kullanımı kanıtlanmış ve çevreci yönüyle dikkat çeken bir yenilenebilir enerji seçeneğidir (Barbier, 2002: 6; Miranda-Barbosa vd., 2017: 6671). Jeotermal enerji, güneş ve rüzgâr gibi kaynaklara göre daha kararlı ve kesintisiz enerji üretebilmesiyle ön plana çıkan, enerji üretimi sırasında verim kaybı yaşamadan sürekli elektrik sağlayabilen, güvenilir ve sistem kararlılığı açısından avantajlı bir yenilenebilir enerji kaynağıdır (Kulasekara ve Seynulaabdeen, 2019: 223). Tablo 2.13'te 2015-2024 yılları arasında dünya toplam jeotermal enerjisi kurulu elektrik kapasitesi (MW cinsinden) sunulmuştur.

**Tablo 2.13. Dünya Toplam Jeotermal Enerjisi Kurulu Elektrik Kapasitesi
(2015-2024, MW)**

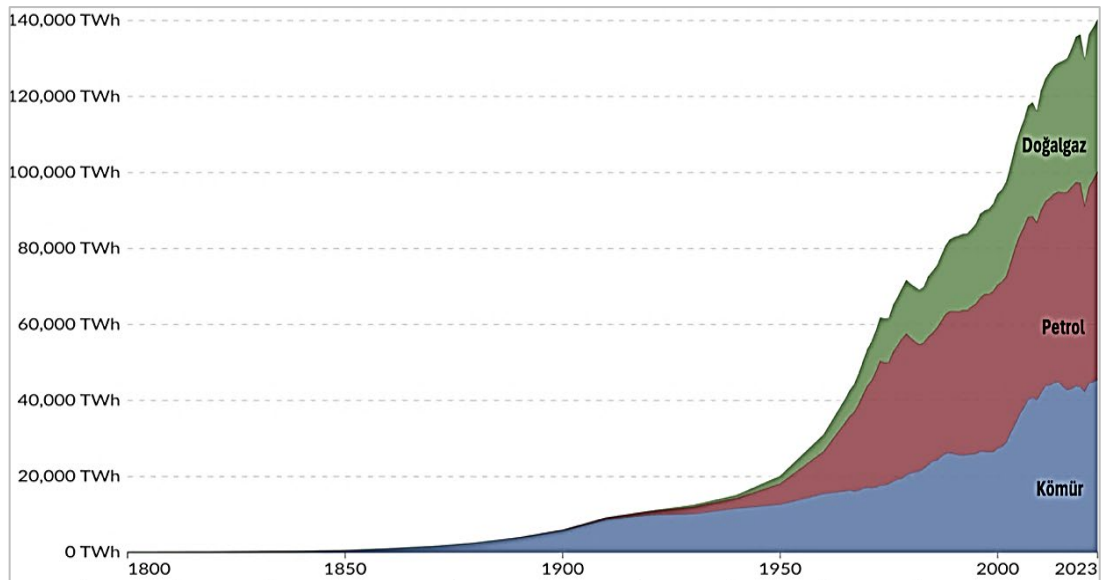
Yıllar	Jeotermal Enerjisi Toplam Kurulu Elektrik Kapasitesi (MW)
2015	11.843
2016	12.169
2017	12.754
2018	13.157
2019	13.824
2020	14.165
2021	14.439
2022	14.664
2023	15.047
2024	15.427

Kaynak: IRENA (2025b).

Tablo 2.13'e göre, jeotermal enerjinin küresel ölçekteki kurulu elektrik kapasitesi 2015 yılından itibaren istikrarlı bir artış göstermektedir. 2015 yılında 11.843 MW olan kapasite, 2024 yılına gelindiğinde 15.427 MW'a ulaşmıştır. Bu artış, jeotermal enerjinin dünya genelinde giderek daha fazla benimsendiğini ve enerji üretiminde yer edindiğini göstermektedir; ancak bu büyümeye rağmen diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında toplam kapasite açısından hâlâ sınırlı bir paya sahiptir.

Yenilenemeyen Enerji Kaynakları

Doğada mevcut olan, kullanıldıklarında tükenen enerji kaynakları yenilenemeyen enerji kaynakları olarak tanımlanmaktadır. Bu enerji türünün fosil ve çekirdek kaynaklı olmak üzere iki çeşidi mevcuttur. Kömür, doğal gaz ve petrol fosil kaynaklı; toryum ve uranyum ise çekirdek kaynaklı yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır (Koç ve Kaya, 2015: 37; Bekar, 2020: 41; Çınar, 2023: 25). Fosil yakıtların yakılmasıyla enerjiye dönüştürülmesi, karbon emisyonunu artıran ve çevre kirliliğine de yol açan en önemli unsurlardan birisidir (Çoban ve Kılınç, 2015: 196). Bu açıdan yenilenemeyen enerji kaynakları kullanımı iklimle mücadele ve çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük risk taşımaktadır. Şekil 2.2'de 1800-2023 yılları arasında dünya fosil yakıt tüketimi TWh cinsinden sunulmuştur.



Şekil 2.2. Dünya Toplam Fosil Yakıt Tüketimi (1800-2023, TWh)

Kaynak: Our World in Data (2024d).

Şekil 2.2'ye göre, 2023 yılı itibarıyla dünya genelinde toplam fosil yakıt tüketimi 140.231 TWh olarak gerçekleşmiştir. Bu miktarın fosil kaynakların türü açısından dağılımı ise doğalgaz 40.102 TWh, petrol 54.564 TWh ve kömür 45.565 TWh şeklindedir. Tablo 2.14'te 2015-2023 yılları arasında dünya toplam birincil enerji tüketimi içerisinde kömürün payı (%) sunulmuştur.

Tablo 2.14. Kömürün Dünya Toplam Birincil Enerji Tüketimindeki Payı (2015-2023, %)

Yıllar	Kömürün Birincil Enerji Tüketimindeki Payı (%)
2015	28,85
2016	27,91
2017	27,61
2018	27,31
2019	26,84
2020	26,99
2021	27,09
2022	26,78
2023	26,53

Kaynak: Our World in Data (2025a).

Tablo 2.14'e göre, 2015-2023 yılları arasında kömürün birincil enerji tüketimindeki payı genel olarak düşüş göstermektedir. 2015 yılında %28,85 seviyesinde olan oran, 2023 yılında %26,53'e gerilemiştir. Gerçekleşen bu azalış kömürün enerji üretimindeki ağırlığının yavaş fakat istikrarlı biçimde azaldığını göstermektedir. Tablo 2.15'te 2015-2023 yılları arasında dünya toplam birincil enerji tüketimi içerisinde petrolün payı (%) sunulmuştur.

Tablo 2.15. Petrolün Dünya Toplam Birincil Enerji Tüketimindeki Payı (2015-2023, %)

Yıllar	Petrolün Birincil Enerji Tüketimindeki Payı (%)
2015	33,87
2016	34,14
2017	34,02
2018	33,47
2019	33,22
2020	31,31
2021	31,46
2022	31,92
2023	32,11

Kaynak: Our World in Data (2025b).

Tablo 2.15'e göre, petrolün birincil enerji tüketimindeki payı 2015'te %33,87 iken, 2023 yılında %32,11'dir. Genel itibarıyla yıllar içerisinde küçük dalgalanmalar olsa da oranın büyük ölçüde sabit kaldığı görülmektedir. Tablo 2.16'da 2015-2023 yılları arasında dünya toplam birincil enerji tüketimi içerisinde doğalgazın payı (%) sunulmuştur.

Tablo 2.16. Doğalgazın Dünya Toplam Birincil Enerji Tüketimindeki Payı (2015-2023, %)

Yıllar	Doğalgazın Birincil Enerji Tüketimindeki Payı (%)
2015	22,97
2016	23,22
2017	23,38
2018	23,84
2019	24,03
2020	24,68
2021	24,41
2022	23,87
2023	23,51

Kaynak: Our World in Data (2025c).

Tablo 2.16'ya göre doğalgazın payı 2015'te %22,97 iken 2020'de %24,68 ile en yüksek seviyeye çıkmış; 2023 yılında ise %23,51'e gerilemiştir. Genel olarak dünya toplam birincil enerji tüketimi içerisinde doğalgazın payı çok az oranda artış göstermiştir. Tablo 2.17'de 2023 yılında dünyada fosil enerji tüketimi en yüksek olan ilk on ülke ve ülkelerin toplam fosil enerji tüketimi TWh cinsinden sunulmuştur.

Tablo 2.17. Dünya Fosil Enerji Tüketimi En Yüksek 10 Ülke (2023, TWh)

Ülkeler	Toplam Fosil Enerji Tüketimi (TWh)
Çin	38.320,82
ABD	21.127,55
Hindistan	9.696,80
Rusya	7.670,83
Japonya	4.058,88
İran	3.515,32
Suudi Arabistan	3.188,50
Güney Kore	2.935,34
Kanada	2.538,33
Endonezya	2.491,82

Kaynak: Our World in Data (2025d).

Tablo 2.7'ye göre, 2023 yılı itibarıyla fosil enerji tüketimi en yüksek ülke 38.320,82 TWh ile Çin olmuştur. Çin'i 21.127,55 TWh ile ABD, 9.696,80 TWh ile Hindistan ve 7.670,83 TWh ile Rusya takip etmektedir. Bu tablo, başta Çin, ABD ve Hindistan olmak üzere büyük nüfusa ve yüksek sanayileşme düzeyine sahip ülkelerin, dünya genelindeki fosil enerji talebinin önemli bir kısmını karşıladığını göstermektedir. Ayrıca Japonya, İran, Suudi Arabistan ve Güney Kore gibi enerji yoğun sektörlerle sahip ülkeler de listede öne çıkmaktadır. Bu veriler küresel fosil yakıt tüketiminin ekonomik büyüme, sanayileşme ve enerji politikalarıyla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Tablo 2.18'de çalışmada yer alan RECAI kapsamındaki 32 ülkenin 2023 yılı toplam fosil enerji tüketim miktarları sunulmuştur.

Tablo 2.18. Çalışmada Yer Alan RECAI Ülkelerinde Toplam Fosil Enerji Tüketim Miktarları (2023, TWh)

Ülkeler	Toplam Fosil Enerji Tüketimi (TWh)	Ülkeler	Toplam Fosil Enerji Tüketimi (TWh)
ABD	21.127,55	Hollanda	766,76
Almanya	2.380,91	İrlanda	139,37
Arjantin	833,53	İspanya	1.022,27
Avustralya	1.407,31	İsrail	260,85
Belçika	486,13	İsveç	157,32
Birleşik	1.428,65	İsviçre	142,14
Brezilya	1.883,23	İtalya	1.353,62
Çin	38.320,82	Japonya	4.058,88
Danimarka	112,90	Kanada	2.538,33
Endonezya	2.491,82	Macaristan	186,75
Fas	248,24	Meksika	2.074,38
Finlandiya	125,73	Mısır	1.028,20
Fransa	1.166,85	Norveç	154,26
Güney Afrika	1.293,33	Şili	340,72
Güney Kore	2.935,34	Türkiye	1.591,71
Hindistan	9.696,80	Yunanistan	239,39

Kaynak: Our World in Data (2025d).

Tablo 2.18'e göre 2023 yılında Çin, 38.320,82 TWh ile açık ara en yüksek fosil enerji tüketimine sahip olan ülkedir. Onu 21.127,55 TWh ile ABD ve 9.696,80 TWh ile Hindistan takip etmektedir. Japonya 4.058,88 TWh, Güney Kore ise 2.935,34 TWh tüketimle ilk beş ülke içerisinde yer almaktadır. Danimarka (112,90 TWh), Finlandiya (125,73 TWh), İrlanda (139,37 TWh), İsviçre (142,14 TWh), Norveç (154,26 TWh),

İsveç (157,32 TWh), Macaristan (186,75 TWh) ülkeleri ise düşük fosil enerji tüketimine sahip olan ülkelerdir. Genel olarak fosil enerji tüketimi en fazla olan ilk üç ülke toplam tüketimin çok büyük bir kısmını oluştururken, çoğu Avrupa ülkelerinin ise fosil yakıt kullanımının sınırlı olduğu görülmektedir.

2.1.2. Ormansızlaşma ve Tarımsal Faaliyet Kaynaklı CO₂ Emisyonu

Salınımı

Ormansızlaşma, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamında, orman alanlarında insan etkisiyle meydana gelen dönüşümler olarak ifade edilmektedir. Bu dönüşümler çoğunlukla ormanların tarımsal üretim, hayvancılık alanları veya yerleşim bölgelerine çevrilmesiyle ortaya çıkmak ve bu tür arazi kullanım değişikliklerinin artması, “ormansızlaşma” kavramını meydana getirmiştir (Tolunay, 2015: 441-442). Ormansızlaşma karbondioksit emisyonunun artmasına oldukça yüksek bir katkı sunmaktadır (Waheed vd., 2018: 4231). Bununla birlikte ormansızlaşma yalnızca doğrudan karbon kaybına yol açmakla kalmayıp, aynı zamanda bölgesel iklim üzerinde yarattığı biyofiziksel etkiler aracılığıyla dolaylı karbon kayıplarını da tetiklemektedir (Li vd., 2022: 1). Küresel ormansızlaşmanın %95'i tropik bölgelerden kaynaklanmakta ve Brezilya ve Endonezya ülkeleri bu oranın yaklaşık yarısına sahiptir (Ritchie ve Roser, 2021). Bu bağlamda, özellikle tropik bölgelerde yoğunlaşan ormansızlaşmanın, arazi kullanım değişikliğine neden olmasının yanı sıra iklim sistemi üzerinde de oldukça önemli etkileri olan bir süreç olduğu kabul edilmelidir.

Tarımsal faaliyetler üç temel sera gazı olan karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve diazot monoksit (N₂O) emisyonlarına neden olmaktadır. Bu gazların iklim değişikliğine olan etkileri birbirinden farklı niteliktedirler. Metan emisyonları en çok hayvanların sindirim süreçlerinden ve gübre yönetiminden kaynaklı olurken, N₂O tarımsal gübrelerin ve hayvan atıklarının toprakla etkileşiminden kaynaklıdır. Karbondioksit emisyonları ise toprakların tarıma açılması ve organik maddenin parçalanmasıyla oluşmaktadır (Joiner ve Toman, 2023). Tarımsal faaliyetler, özellikle arazi kullanım değişikliği yoluyla en çok CO₂ emisyonlarının artışına neden olmaktadır. Ancak tarımın yalnızca bir karbon kaynağı değil, aynı zamanda uygun yönetim uygulamalarıyla karbon yutağına da dönüşebileceği unutulmamalıdır (Mahmood vd., 2019).

2.2. CO₂ Emisyonu ile İlgili Anlaşmalar ve Politikalar

CO₂ salınımlarının azaltılması iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir rol oynamakta ve bu nedenle ülkeler, farklı dönemlerde çeşitli uluslararası anlaşma ve politikaları yürürlüğe koymaktadırlar. Sera gazı emisyonlarının küresel ölçekte düşürülmesi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin desteklenmesi ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin hafifletilmesi amacıyla gerçekleştirilen “Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), Kyoto Protokolü, Paris İklim Anlaşması, Glasgow İklim Paketi ve Avrupa Yeşil Mutabakatı (AYM)” gibi önde gelen anlaşma ve politikalar aşağıda açıklanmıştır.

2.2.1. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sözleşmesi (UNFCCC)

İklim değişikliğiyle küresel mücadeledeki ilk büyük adım 1992 Rio Zirvesi’nde kabul edilen “Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi” (UNFCCC) ile atılmıştır. 1994’te yürürlüğe giren bu sözleşme, ülkelerin gelişmişlik seviyelerine göre farklı sorumluluklar üstlendiği “ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluk” ilkesine dayanmaktadır. Bu kapsamda taraf ülkeler Ek I ve Ek II olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Ek I listesinde Avrupa ve eski Sovyetler Birliği ülkeleri ve Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) üyesi ülkeleri bulunmaktadır ve bu ülkeler sera gazı emisyonlarını azaltmakla yükümlü tutulmuştur. Ek II’de ise sadece OECD üyesi gelişmiş ülkeler bulunurken bu ülkeler, gelişmekte olan ülkelere finansal ve teknik destek sağlama yükümlülüğüne sahiptir (Karakaya ve Özçağ, 2001: 2-3; Sadioğlu ve Ağıralan, 2020: 363). Bu sözleşmenin temel amacı, atmosferdeki sera gazı yoğunluğunu tehlikeli düzeydeki iklim değişikliklerine yol açmayacak bir seviyede tutmayı sağlamaktır. AB’nin çevre politikaları kapsamında azaltmayı hedeflediği başlıca kirletici maddeler arasında sülfür dioksit, karbondioksit, karbon monoksit ile kurşun ve kurşun bileşikler yer almaktadır. Sözleşmenin taraflarının taahhütlerini yerine getirip getirmediğini değerlendirmek amacıyla ise her yıl “Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Taraflar Konferansı (COP)” düzenlenmekte ve uygulamaların uluslararası düzeyde izlenebilirliği sağlanmaktadır (Çömert vd., 2015: 884).

2.2.2. Kyoto Protokolü

1997 yılında Japonya'nın Kyoto şehrinde düzenlenen 3. Taraflar Konferansı'nda (COP3) sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik yasal bağlayıcılığı olan Kyoto Protokolü kabul edilmiş ve 2005 yılında yürürlüğe girmiştir (Özcan 2020: 170; Sadioğlu ve Ağralan, 2020: 363). Bu protokol 1990 yılına kıyasla sera gazı emisyonlarının azaltılmasını hedefleyen yasal bağlayıcılığa sahip ilk uluslararası anlaşmalardan birisi olmuştur. Hazırlık sürecinde Berlin'de 1995'te kabul edilen Berlin Mandası önemli bir temel oluştururken, görüşmelerde AB 2010 yılına kadar emisyonları %15 azaltma hedefi sunmuştur. Ancak bu hedef, başta ABD, Avustralya, Kanada ve Japonya olmak üzere bazı gelişmiş ülkelerin karşı çıkması nedeniyle kabul edilmemiştir (Türkeş, 2001: 3). Sonuç olarak Kyoto Protokolü çerçevesinde, 2008-2012 yılları arasında taraf ülkelerin sera gazı salımlarını 1990 yılına kıyasla en az %5 oranında düşürmeleri amaçlanmıştır. AB bu kapsamda, %8 oranında bir azaltım yapacaklarını taahhüt etmiştir. Bazı ülkelere (Avustralya %8, İzlanda %10 ve Norveç %1 oranında) bu dönem boyunca emisyonlarını artırma hakkı tanınmıştır. Öte yandan, bazı ülkelerin (Yeni Zelanda, Rusya ve Ukrayna) ise emisyonlarını 1990 yılı seviyesinde sabit tutmalarına izin verilmiştir. Bu düzenlemelerle ülkelerin farklı ekonomik ve çevresel koşulları göz önünde bulundurulmuş ve ülkelerin esnek sorumluluklar üstlenmesine fırsat verilmiştir (Güler ve Dural, 2007, akt. Turan ve Güler, 2013: 955-956). Tablo 2.19'da Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) ile Kyoto Protokolü arasındaki temel farklılıklar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 2.19. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sözleşmesi (UNFCCC) ve Kyoto Protokolü Arasındaki Temel Farklılıklar

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sözleşmesi (UNFCCC)	Kyoto Protokolü
Ek-I Taraflarının 2000 yılında sera gazlarının salımlarının 1990 yılı düzeyine indirmesi hedefi, sadece iyi niyet düzeyindedir.	Ek-I Tarafları, 1. Dönem için (2008-2012) somut sayısal hedefler almaktadır.
Yaptırım gücü zayıf.	Hedeflere ulaşılamaması halinde sonraki dönemler için geçerli olacak ağır yaptırımlar söz konusudur.
Esneklik kuralları (hesaplamalar için geçerli olacak temel yılı belirlenmesi) sadece belli ülkeler (Piyasa ekonomisine geçiş sürecindeki ülkeler) için geçerlidir.	Gerekli hazırlıkları tamamlayan tüm taraflar, esneklik düzeneklerine (Ortak Yürütme (JI), Temiz Kalkınma Düzenegi (CDM), Salım Ticareti(ST)) katılabilir.
Ülkeler arası ayırım için tek kriter; OECD üyeliği ve gelişmişlik derecesidir.	Her ülke görüşmeler yoluyla kendisi için farklı bir konum belirleyebilir.
İklim değişikliği sürecinin temel metni	2005 yılından itibaren 2012-sonrası dönem için (süre, yükümlülük oranları, ülkeler) yeni görüşmeler başlayacak, bu amaçla yeni ittifaklar kurulabilecektir.

Kaynak: Arıkan (2006: 57).

Tablo 2.19’a göre, UNFCCC daha çok genel çerçeve sunarken, Kyoto Protokolü’nün ise bağlayıcı hedefler ve yaptırımlarla daha güçlü bir uygulama mekanizması getirdiği görülmektedir.

Kyoto Protokolü kapsamında taraf ülkelerin emisyon azaltım yükümlülüklerini yerine getirebilmeleri için esneklik mekanizmaları geliştirilmiştir. Bu mekanizmalar; Temiz Kalkınma Mekanizması (CDM), Ortak Yürütme Mekanizması ve Piyasa Emisyon Ticaret Sistemi olmak üzere üç ana grupta toplanmıştır (Narin, 2013: 954-946). Söz konusu mekanizmalar aşağıda ayrıntılı bir biçimde açıklanmaktadır.

Temiz Kalkınma Mekanizması (CDM)

Temiz Kalkınma Mekanizması’na göre emisyon hedefi belirlemiş bir ülke, emisyon hedefi belirlememiş azgelişmiş bir ülke ile iş birliği yaparak, o ülkede seragazı emisyonları azaltılmasına yönelik projeler yaparsa “Sertifikalandırılmış Emisyon Azaltma Kredisi (CER)” kazanmakta ve kazanılan kredi miktarı kadar daha fazla emisyon oluşturma hakkı elde etmektedir (Karakaya ve Özçağ, 2001: 3; Çelikkol ve Özkan, 2015: 205). Temiz Kalkınma Mekanizması, gelişmekte olan ülkeler için

ekonomik kazanç sağladığı ve çevreye katkı sunduğu için en çok tercih edilen yöntemlerden birisidir. Bu mekanizma gelişmiş ülkelerin emisyon azaltım hedeflerine geliştirmekle olan ülkelerde yürüttükleri projelerle ulaşmalarına imkân tanımaktadır. Aynı zamanda teknoloji transferi ve yatırım yoluyla sürdürülebilir kalkınmayı desteklerken, sera gazı emisyonlarını da azaltmayı amaçlayan bir sistemdir (Lim ve Lam, 2014: 277; Watts vd., 2015: 1176).

Ortak Yürütme Mekanizması

Kyoto Protokolü'nün 6. maddesi kapsamında yer alan Ortak Yürütme Mekanizması, Ek-I ülkelerine emisyonların azaltılması amacıyla proje yürütme imkânı sunmaktadır. Yani emisyon hedefi belirlemiş bir ülke, emisyon hedefi belirlemiş bir diğer ülkede yatırım yaparsa ve bu projeleri sonucunda “Emisyon Azaltım Birimi” (Emission Reduction Unit - ERU) adı verilen azaltma kredileri kazanmaktadırlar. Ülkeler, daha sonra elde ettikleri ERU’ları kendi toplam sera gazı emisyon miktarlarından düşebilmektedirler (Karakaya ve Özçağ, 2001: 3; Narin, 2013: 946). 1995 yılında Berlin’de gerçekleştirilen ilk Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Taraflar Konferansı’nda (COP 1) ele alınan temel konulardan biri olan Ortak Yürütme Mekanizması, iklim değişikliği gibi küresel bir sorunun çözümünün ancak uluslararası düzeyde iş birliğiyle mümkün olabileceğini bildirmektedir (Wirl vd., 1998: 203-204).

Emisyon Ticaret Sistemi

Kyoto Protokolü'nün 17. maddesi Ek-I ülkeleri arasında sera gazı emisyonlarının ticaretine olanak sağlamaktadır. Bu sistem kapsamında bir ülke, sahip olduğu belirlenmiş azaltım birimlerinin (AAU) bir kısmını başka bir ülkeye devredebilir; devralan ülke ise bu miktarı kendi emisyon kotasına ekleyebilir. Böylece emisyon ticareti, taraf ülkeleri yükümlülüklerini yerine getirme konusunda teşvik edici bir araç haline gelmektedir. Karbon piyasaları iki temel yapıdan oluşmaktadır. İlki "Cap and Trade" sistemi olup bu yapıda, emisyon sınırını aşan şirketler diğer şirketlerden salım hakkı satın alabilirken, sınırın altında kalanlar fazla haklarını satabilir ya da sonraki dönemlerde kullanmak üzere saklayabilirler. İkincisi ise proje temelli sistemlerdir ve şirketler farklı bölgelerde gerçekleştirdikleri yatırımlar yoluyla karbon kredisi elde edebilir; bu krediler, emisyon yükümlülüklerini azaltmak ya da piyasada ticaret yapmak amacıyla kullanılabilirler (Narin, 2013: 946). Yani AB Emisyon

Ticareti Sistemi (ETS), farklı ülkeler veya şirketler arasında karbon azaltım maliyetleri değiştiği için ticaret yoluyla daha ucuza emisyon azaltımı sağlanabileceği fikrine dayanmaktadır (Sandoﬀ ve Schaad, 2009: 3967). Böylece bu sistem ile zamanla azalan ve sınırlı sayıda kalan emisyon hakları ile şirketlerin, bu emisyon haklarını alıp satarak bir karbon piyasası oluşturmalarını ve böylece ekonomik yoldan emisyon azaltımının sağlanması amaçlanmaktadır (Beck ve Kruse-Andersen, 2020: 781).

2.2.3. Paris İklim Anlaşması

2015 yılında 195 ülkenin katılımıyla gerçekleşen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin 21. Taraflar Konferansı'nda kabul edilen Paris İklim Anlaşması 2016 yılında uygulamaya konmuştur. Paris İklim Anlaşması'nın temel hedefi, küresel sıcaklık artışını 2°C'nin altında tutmayı ve mümkünse 1,5°C'ye kadar düşürmektir. Yürürlüğe girmesinden sonra ülkeler kendi ulusal emisyon azaltım planlarını oluşturmaya başlamıştır. 2019'da Madrid'deki zirvede özellikle karbon piyasaları ve finansman ön plana çıkmıştır. Ayrıca 2020 yılı itibarıyla birçok ülke daha iddialı iklim hedefleri koymaya başlamıştır (Ergül, 2025: 35; Fan vd., 2025: 2). Anlaşma, önceki protokollerden farklı olarak gelişmiş ve gelişmekte olan tüm ülkeleri emisyon azaltımına katılmaya teşvik eden katılımcı bir yapıya sahiptir. Ülkeler Ulusal Katkı Beyanları (NDC) ile kendi iklim hedeflerini belirleyebilmekte ve bu hedefleri düzenli raporlama ve gözden geçirme süreçleriyle izlenmektedir. Anlaşma “vaat ve izleme” ilkesine dayanmakta olup, sorumluluk paylaşımında ise gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında esneklik içeren bir farklılaştırma yaklaşımı mevcuttur (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, t.y.). Paris İklim Anlaşması'nın temel sonuçları ise aşağıdaki gibi özetlenebilir (Karakaya, 2016: 3):

- Tüm ülkeler emisyon azaltımı taahhüdü vermektedir; ancak gelişmiş ülkelerden daha fazla ve mutlak azaltım yapmaları beklenirken, gelişmekte olan ülkelere kapasitelerine göre katkı istenmektedir.
- 2050 sonrası için gelişmiş ülkelerin karbon nötr olmaları hedeflenmektedir.
- Küresel sıcaklık artışının 2°C'nin altında, tercihen 1.5°C seviyesinde tutulması kararlaştırılmıştır.
- Gelişmiş ülkelerin gelişmekte olanlara iklim finansmanı, teknoloji ve kapasite geliştirme desteği sağlaması beklenmektedir.

- 2020'ye kadar yıllık 100 milyar dolar finansman hedeflenmiş, 2025 sonrası için bu taban alınarak artırılması öngörülmüştür.
- Emisyon hedefleri ve ilerlemeler şeffaf ve izlenebilir biçimde raporlanacaktır.
- Her beş yılda bir daha iddialı azaltım hedeflerinin belirlenmesi istenmektedir.
- İklim değişikliğine uyum süreci vurgulanmış, özellikle savunmasız ülkelerin desteklenmesi taahhüt edilmiştir.

Ayrıca Paris İklim Anlaşması, özellikle fosil yakıtların CO₂ emisyonlarını artırdığını ve fosil yakıt tüketiminden yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yapılması gerektiğini böylece daha düşük karbon salımıyla çevre ve iklim üzerinde olumlu etkiler sağlanacağını belirtmektedir (Alsagr vd., 2025). Böylece anlaşma karbon emisyonunun azaltımının nasıl gerçekleştirilebileceği konusunda da ülkelere yol göstermektedir.

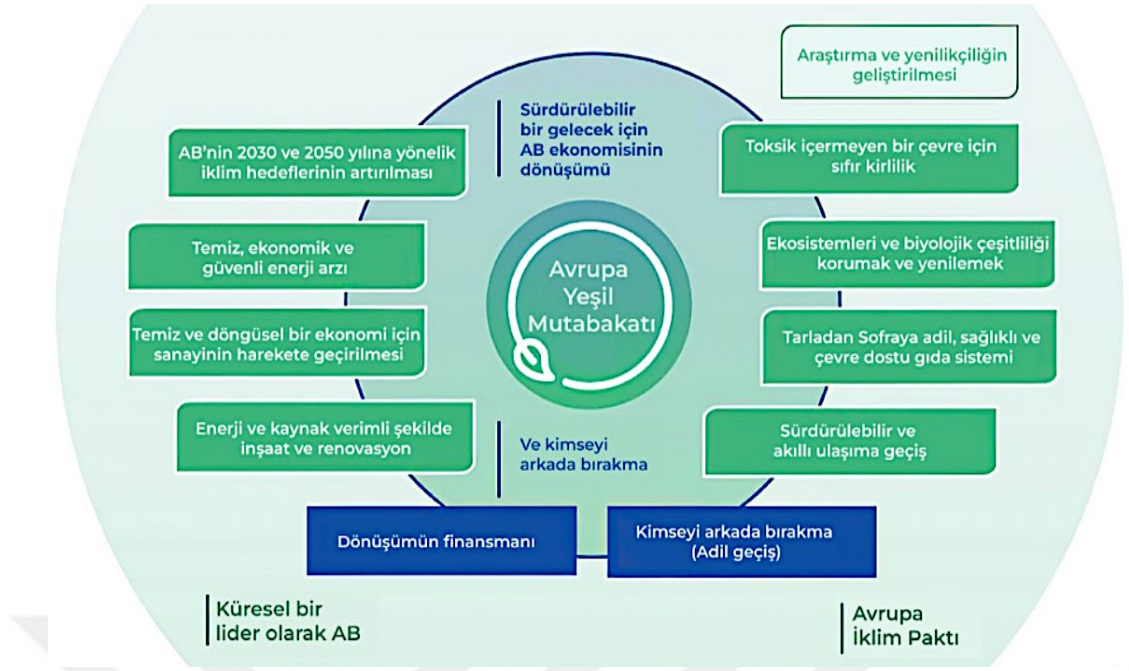
2.2.4. Glasgow İklim Paktı

31 Ekim-12 Kasım 2021'de İskoçya'nın Glasgow şehrinde iklim değişikliği ile mücadele için 26. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Taraflar konferansı (COP26) gerçekleştirilmiştir. Toplantıda 197 ülke yer almış ve iklim krizine karşı ortak hareket etme çabaları “emisyonların azaltılması, uyum çalışmaları, finansman desteği ve uluslararası iş birliği” şeklinde dört ana başlıkta toplanmıştır. Ülkelerden, 2030 yılına kadar uygulanabilir eylem planları oluşturmaları ve bu planları şeffaf biçimde izlemeye olanak sağlayacak sistemler geliştirmeleri talep edilmiştir. Ayrıca, küresel sıcaklık artışının 1,5°C ile sınırlandırılması hedefini gerçekleştirmek amacıyla Paris Anlaşması'nın sıcaklık hedefi doğrultusunda ülkelerin Ulusal Katkı Beyanları (NDC)'ni her beş yılda bir güncellemeleri istenmiştir (Demir, 2022: 163; Rowan, 2025: 1-2). Zirvede aynı zamanda Paris Anlaşması çerçevesinde yer alan “kömürden kademeli çıkış” hedefi yerine, Hindistan'ın önerisi doğrultusunda “kademeli azaltım” ifadesi kabul edilmiştir. Bu karar beklentilerin altında kalsa da kömür kullanımına dair ilk somut adım olması açısından önem taşımaktadır. Hindistan'ın 2070 yılı için net sıfır emisyon taahhüdü açıklaması ve Çin ile ABD arasında imzalanan iklim iş birliği anlaşması, zirvenin öne çıkan gelişmeleri arasında yer almıştır. Toplamda 135 ülke net sıfır hedefi açıklamasına rağmen, bunların yalnızca 66'sı ilgili taahhütleri yasal düzenlemelerle güvence altına almıştır. Türkiye ise hedefini sözlü olarak bildirmiş

ancak henüz yasal bir çerçeve oluşturmamıştır. Mevcut taahhütler dünyanın 2,7°C'lik bir ısınma rotasında ilerlediğini göstermekte olup bu durum ülkelerin iklim taahhütlerini hayata geçirmesinin ve iklim eylemlerinin COP zirveleriyle sınırlı kalmamasının gerekliliğini ortaya koymaktadır (Tema Vakfı, 2022).

2.2.5. Avrupa Yeşil Mutabakatı (AYM)

Avrupa Yeşil Mutabakatı, AB'nin Paris İklim Anlaşması hedefleri doğrultusunda 11 Aralık 2019'da açıklanan yeni büyüme stratejisi olarak ortaya çıkmıştır. Mutabakat; Avrupa'yı 2050'ye kadar iklim-nötr hale getirmeyi amaçlamaktadır. Kaynak verimliliği, rekabetçilik ve modern ekonomik yapı hedeflenerek; üretim, enerji, ulaşım, tarım ve vergilendirme gibi birçok alanda kapsamlı dönüşümler beklenmektedir. Bu hedeflere ulaşmak için ise ilk 10 yılda yaklaşık 1 trilyon avruluk sürdürülebilir yatırımların gerçekleştirilmesi planlanmaktadır (T.C. Dışişleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı, 2024). Ayrıca Avrupa Komisyonu, Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında iklim, enerji, ulaşım ve vergilendirme politikalarını 2030 yılına kadar net sera gazı emisyonlarını 1990 seviyelerine kıyasla en az %55 oranında azaltacak şekilde yeniden düzenlemeyi hedeflemektedir (European Commission, t.y.). Avrupa Yeşil Mutabakatı'nı uygulamaya yönelik mevzuatlar "Fit for 55" paketi ile şekillendirilmiştir. Bu paket ekonominin tüm sektörlerinde dönüşüm öngörerek sürdürülebilir ulaşım, temiz enerji, dögüsel ekonomi ve gıda güvenliği gibi alanları kapsamaktadır. Ayrıca Sınırdaki Karbon Düzenlemesi Mekanizması (SKDM) gibi araçlarla hem AB sanayisini karbon yoğun ithalata karşı korumayı hem de dünya ticaretini AB'nin iklim hedefleriyle uyumlu hale getirmeyi amaçlamaktadır (Voyvoda, 2025: 46-47). Şekil 2.3'te Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın temel hedef ve alanları sunulmuştur.



Şekil 2.3. Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın Temel Hedef ve Alanları

Kaynak: T.C. Dışişleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı (2024).

Şekil 2.3'e göre "Avrupa Yeşil Mutabakatı" diyagramı, AB'nin iklim nötr bir kıta olma hedefi doğrultusunda bütüncül bir dönüşüm stratejisi izlediğini ortaya koymaktadır. Merkezde yer alan iklim hedefi etrafında; enerji, sanayi, ulaştırma, tarım, çevre ve finansman gibi pek çok sektörü kapsayan politika alanları yer almaktadır. Bu yapı iklim eyleminin yalnızca çevre politikalarıyla sınırlı kalmadığını, aynı zamanda tüm ekonomik ve sosyal sistemlerin dönüşümünü hedeflediğini göstermektedir. Ayrıca "Kimseyi geride bırakmama" ilkesiyle sosyal adaletin de göz önünde bulundurulduğu anlaşılmaktadır.

2.3. CO₂ Emisyonu ile İlgili Teorik Yaklaşımlar

Bu bölümde çalışma kapsamında yer alan fosil enerji tüketimi ve yenilenebilir enerji tüketimi, doğrudan yabancı yatırımlar, dış ticaret, ekonomik büyüme ve kentleşme değişkenleri açısından iktisat literatüründe CO₂ emisyonlarını açıklamak için yaygın olarak kullanılan teorik yaklaşımlar yer almaktadır. Tablo 2.20'de CO₂ emisyonu ile ilgili teorik yaklaşımlar ve açıklanan değişkenler sunulmuştur.

Tablo 2.20. CO₂ Emisyonu ile İlgili Teorik Yaklaşımlar ve Açıklanan Değişkenler

CO₂ Emisyonu ile İlgili Teorik Yaklaşım	Değişken
Ekolojik Modernleşme Teorisi (EMT)	Yenilenebilir Enerji Tüketimi
Çevresel Kuznets Eğrisi (ÇKE)	Ekonomik Büyüme
Kirlilik Cenneti (Sığınağı) Hipotezi (KCH)	Doğrudan Yabancı Yatırımlar
Antweiler, Copeland ve Taylor Yaklaşımı (ACT)	Dış Ticaret
Negatif Dışsallıklar Teorisi ve Karbon Vergisi Yaklaşımı	Fosil Enerji Tüketimi
STIRPAT Modeli	Kentleşme

Kaynak: Tablo tarafımızca oluşturulmuştur.

Tablo 2.20'ye göre, yenilenebilir enerji tüketimi değişkeni Ekolojik Modernleşme Teorisi (EMT) ile ilişkilendirilirken, ekonomik büyüme değişkeni Çevresel Kuznets Eğrisi (ÇKE) çerçevesinde ele alınmaktadır. Doğrudan yabancı yatırımların etkisi Kirlilik Cenneti (Sığınağı) Hipotezi (KCH), dış ticaret değişkeni Antweiler, Copeland ve Taylor (ACT) yaklaşımı, fosil enerji tüketimi ise negatif dışsallıklar teorisi ve karbon vergisi yaklaşımı, kentleşme değişkeni ise STIRPAT modeli ile açıklanmaktadır.

2.3.1. Ekolojik Modernleşme Teorisi (EMT)

Ekolojik Modernleşme Teorisi (EMT), günümüzün çevresel sorunları ile mücadele ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için çözüm arayışları açısından literatürde önemli bir yaklaşım olarak yer almaktadır. Mol ve Sonnenfeld (2000) tarafından ortaya atılan Ekolojik Modernleşme Teorisi'ne göre, çevreyi iyileştirmenin temelinde ekonomik sistemde dönüşümün gerekliliği yer almaktadır. Bu bakımdan yeşil teknoloji yatırımları, temiz enerji kullanımı ve kurumsal çevre politikalarının artırılıp güçlendirilmesiyle, kalkınma ve çevrenin birlikte var olabileceğini ifade etmektedir. Yöntem, yenilenebilir enerjiyi teşvik eden mevzuatın çevre sorunlarının ele alınmasına yardımcı olabileceğini iddia etmektedir. Doğal kaynakların sınırlı olması, çevresel bozulmanın artış göstermesi ve sürdürülebilir kalkınmayı sağlayabilmek günümüz dünyasının çözüme ulaştırması gereken başlıca meselelerdir. Ekolojik Modernleşme Teorisi'ne göre, teknik ilerlemeler ve endüstriyel süreçlerin çevresel sorunları ele alacak şekilde yeniden düzenlenmesi, çevrenin korunması ile ekonomik büyüme arasında bir bağlantı kurulması gerekmektedir. Ayrıca EMT, sadece söz konusu bu teknolojik ilerlemeler ile değil aynı zamanda

devletin düzenleyici rolünün gerekliliğine, piyasa güçlerinin etkinliğine ve sivil toplumun çevresel sorunların çözümüne aktif bir şekilde katılması gerektiğine işaret etmektedir (Mol vd., 2013).

Ekolojik Modernleşme, Almanya ve Hollanda gibi ülkelerde 1980'lerin başında çevresel bozulma ve çevre politikalarını kapsayan tartışmaların artmasıyla birlikte teorik olarak şekillenmiştir. Bu süreçte çevre sosyologları ve ilgili alanlardaki araştırmacılar, söz konusu dönemde çevresel konuların ekonomik ve teknolojik bir çerçevede ele alınmasını ve bu bağlamda yapılacak düzenlenmelerin teşvik edilmesini gerektiren stratejiler öne sürmüşlerdir (Gülçur, 2012).

Ekolojik Modernleşme Teorisi'nin temel önermesi, çevresel bozulmayı durdurmak ve sürdürülebilir kalkınmayı garanti altına almak için teknolojik ilerlemelerin ve endüstriyel süreçlerin yeniden düzenlenmesiyle birlikte çevre dostu üretim tekniklerinin benimsenmesinin gerekliliğidir (Mol vd., 2013). Örneğin Jänicke (1985) ve Huber (2000)'in çalışmalarından da elde edilen sonuçlar, teknolojik gelişme ve endüstriyel operasyonların çevre dostu hale getirilmesinin, çevresel bozulmayı durdurarak sürdürülebilir büyümeyi sağlamak için gerekli olduğunu işaret etmektedir. Bu bakımdan EMT'nin, çevresel sorunların nedenlerini yalnızca doğrudan kirlilik veya doğal kaynak kullanımı olarak değil, aynı zamanda ekonomik yapı ve üretim süreçleri bağlamında da ele alan bir teori olduğu görülmektedir. Buna göre çevresel problemlerin çözümü için ekonomi, politika ve sosyal yapı etkileşimini sağlayan stratejiler geliştirilmiştir. Böylece çevresel reform ve teknolojik yeniliğin entegrasyonu ile hem kısa vadeli problemlerin çözümü hem de uzun vadeli sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşabilecek ve geçici çözümlerden ziyade kalıcı çözümler üretilmiş olacaktır (Şahin, 2022).

Ekolojik Modernleşme Teorisi'nin pratik uygulamaları endüstriyel süreçlerin çevre dostu teknolojilerle entegrasyonundan temiz üretim yöntemlerinin benimsenmesine kadar geniş bir yelpazeyi içermektedir. Almanya ve Hollanda, EMT'nin teoride öne sürdüğü prensiplerin uygulamaya geçirildiği somut örneklerdir (Gülçur, 2012).

Ekolojik Modernleşme Teorisi'ndeki pratik uygulamalar, kentsel planlama, enerji verimliliği ve atık yönetimi gibi alanlarda da kendini göstermektedir. Şehirlerin altyapısında uygulanan yenilikçi teknolojiler ve sürdürülebilir enerji politikaları,

EMT'nin pratik yansımalarından bazılarıdır. Bu uygulamalar hem ekonomik büyüme hem de çevresel sürdürülebilirlik arasındaki dengeyi korumayı hedeflemektedir. Ayrıca, özel sektör yatırımları ile devlet destekli projelerin iş birliği, çevre dostu teknolojilerin ortaya çıkmasında ve yaygınlaşmasında kilit rol oynamaktadır (Mol vd., 2013). EMT'nin pratiğe döküldüğü alanlarda kapitalist üretim dinamiklerinin çevresel bozulmaya neden olan yönleri tamamen ortadan kaldırılamamaktadır. Bu durum ise teorinin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmadaki yetersizliklerini ve mevcut ekonomik yapının sorunlarını tamamen çözmediğini göstermektedir (Orhan, 2004; Ewing, 2017). Ancak EMT çevresel reform ve teknolojik yenilikler açısından önemli politikaların geliştirilmesine katkı sağlamaya devam etmektedir.

Bunlarla birlikte modern dönemde EMT'nin etkileri yenilenebilir enerji, atık yönetimi ve çevre dostu şehir planlama uygulamaları gibi çeşitli alanlarda somutlaşmaktadır. Bu sayede, ekonomik büyüme ile çevresel koruma arasında oluşturulmaya çalışılan denge hem politikada hem de akademik tartışmalarda yeniden ele alınmaktadır. Yenilikçi teknolojilerin ve iş modellerinin benimsenmesi, endüstriyel üretimde çevresel maliyetlerin azaltılmasını hedeflemekte, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınmanın ekonomik boyutunu güçlendirmektedir. Böylece, EMT hem teorik hem de pratik alanlarda modern çevre politikalarına ilham kaynağı olmaktadır (Mol vd., 2013).

Sonuç olarak Ekolojik Modernleşme Teorisi, çevre bozulması, ekonomik büyüme ve sürdürülebilir kalkınma arasındaki etkileşimleri anlamada önemli bir kuramsal çerçeve sunmaktadır. Tarihsel gelişimi, 1980'lerdeki çevresel politika tartışmaları ve teknolojik yeniliklerden kaynaklanmakta olup, devlet, piyasa ve sivil toplum arasındaki etkileşimin rolüne vurgu yapmaktadır. EMT çevre dostu teknolojilerin ve temiz üretim tekniklerinin endüstriyel süreçlere entegrasyonunu savunurken, çevresel problemlerin çözümünün yalnızca teknolojik yeniliklerle sınırlı kalmayıp yapısal değişimlere de ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda modern endüstriyel yapılar içerisinde sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi için teknolojik, ekonomik ve sosyal alanlarda entegre politikaların geliştirilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır.

2.3.2. Çevresel Kuznets Eğrisi (ÇKE)

Çevresel Kuznets Eğrisi (ÇKE) modeli, çevresel bozulma ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkinin matematiksel ve görsel bir temsilini sunmaktadır. Simon Kuznets tarafından 1950'lerde gelir eşitsizliği üzerine oluşturulan orijinal Kuznets Eğrisi, Çevresel Kuznets Eğrisi kavramının temelini oluşturmaktadır. Ancak Grossman ve Krueger'in çalışmasıyla (1995) birlikte ekonomik genişleme ve çevresel bozulma arasındaki bağlantıyı inceleyen çalışmalar daha yaygın bir şekilde tartışılmaya başlanmıştır. Bu dönemde, çevre kirliliğinin ekonomik genişlemenin belirli aşamalarında arttığı ve gelir seviyeleri yükseldikçe azaldığı kaydedilmiştir (Demirtaş, 2023). ÇKE modeline göre ekonomik genişleme başlangıçta daha yüksek düzeyde çevre kirliliğine neden olurken, kişi başına düşen gelir belirli bir eşiğin üzerine çıktığında çevresel bozulma azalma eğilimine girmekte ve ters U şeklinde bir eğriye dönüşmektedir (Panayotou, 1997; Stern 2004; Çetin ve Saygın, 2019). Modele göre ekonomik genişleme özellikle sanayileşme ve kentleşmenin bir sonucu olarak çevre üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Başka bir ifadeyle, ekonomik genişleme, üretim atıkları, fosil yakıt kullanımı ve yetersiz teknoloji altyapısı gibi nedenlerle ilk aşamada çevresel bozulmayı artırmaktadır. Ancak ekonomik büyüme düzeyi iyileştikçe toplum çevre konusunda daha bilinçli hale gelmekte, teknolojik gelişmeler çevre dostu üretim süreçlerinin uygulanmasını sağlamakta ve çevreyi korumak için kamu politikaları oluşturulmaktadır (Aydın ve Değirmenci, 2021).

Aydın vd. (2019) çalışmalarında, 1990'lar boyunca birçok ülkede yürütülen çok sayıda ampirik araştırmanın, ÇKE hipotezinin uygulanabilirliği konusunda bir dizi bulgu olduğunu; bazı araştırmalarda ters U şeklinde bir bağlantı görüldüğünü ancak gelir seviyelerinin artışıyla çevresel bozulmanın kötüleşme eğilimi sergilediği sonucuna ulaşılmışlardır. Erdoğan vd. (2015), modelin temel önermesinin ulusal ekonomik yapı, çevresel düzenlemeler, teknolojik gelişmeler ve toplumsal bilinç gibi değişkenlere bağlı olduğunu, modelin uygulanabilirliğinin ülkeden ülkeye farklılık gösterebileceği belirtilmiştir. Bu duruma paralel olarak Stern (2004), gelir artışının çevresel bozulmayı otomatik olarak azaltacağına dair varsayımın her zaman geçerli olmadığını; hatta belirli koşullarda çevresel sorunların daha da artabileceğini belirlemiştir.

Bu sonuçlar ÇKE modelinin ülkelerin ekonomik ve teknolojik gelişmişlik düzeyine, çevre politikalarının etkinliğine ve diğer yapısal faktörlere bağlı olarak farklı sonuçlar doğurabileceğini ortaya koymaktadır.

Çetin ve Saygın (2019) ile Aydın ve Değirmenci (2021), ÇKE hipotezinin aşamalarına ilişkin birtakım politikaların mevcut olduğunu ifade etmektedir. Birinci aşamada, özellikle sanayileşmenin erken dönemlerinde ve düşük gelir gruplarında, çevresel bozulmayı azaltmaya yönelik doğrudan önlemler alınması gerekmektedir. Bu önlemler, hava ve su kirliliğini azaltan düzenlemeler, çevre koruma standartlarının artırılması ve endüstriyel atık yönetimi gibi uygulamaları içermektedir. Ayrıca, çevre dostu teknolojik yatırımların teşvik edilmesi hem kamu hem de özel sektör iş birliğiyle, uzun vadeli sürdürülebilir büyüme stratejilerinin bir parçası olmalıdır.

İkinci aşamada, gelir seviyesinin arttığı noktalarda, toplumun çevre bilincinin yükseltilmesi amacıyla eğitim programları ve kamu farkındalığı kampanyaları önem kazanmaktadır. Bu aşamada, çevresel performansı iyileştiren inovasyon politikalarının devreye sokulması, yeşil teknolojilere yatırım yapılarak karbon ayak izinin azaltılması gerekmektedir. Böylece, ekonomik büyümeyle birlikte çevre standartları da yükseltilerek çevresel bozulma azaltılacaktır (Menezes vd., 2023). Bu bağlamda, teknolojik transfer, çevre düzenlemeleri ve küresel iklim değişikliği anlaşmaları, ekonomik büyüme sürecinde çevresel kalitenin korunması için kritik öneme sahiptir.

Kısacası ekonomik büyüme yalnızca gelir artışı ve üretim kapasitesiyle sınırlı kalmayıp, farklı sosyal ve çevresel dengelerle birlikte ele alınması gereken çok boyutlu bir süreçtir. Çevresel Kuznets Eğrisi hipotezi, başlangıçta ekonomik büyüme ile artan çevresel bozulmanın belirli bir kişi başına gelir eşiğinin aşılmasıyla çevresel kalitenin iyileşmesine işaret etmektedir. Bu durum ülkelerde uygulanan çevresel politikaların, ekonomik yapı özelliklerinin ve teknolojik gelişmelerin ÇKE hipotezinde yer alan aşamaların gerçekleşmesi için önemli faktörler olarak öne çıktığını göstermektedir.

2.3.3. Kirlilik Cenneti (Sığınağı) Hipotezi (KCH)

Kirlilik Cenneti Hipotezi (KCH) ya da Kirlilik Sığınakları Hipotezi'ne göre, çevresel regülasyonları zayıf olan ülkeler, kirlетici sektörlerde faaliyet gösteren uluslararası firmalar için cazip hale gelmektedir (Copeland ve Taylor, 2004; Taylor, 2005). Bu durum ise yatırımın çevresel maliyetlerini ev sahibi ülkelere yükleme sonucunu doğurabilmektedir. KCH, gelişmiş ülkelerin daha katı çevre düzenlemeleri

nedeniyle kirletici endüstrilerini, çevre standartları nispeten daha esnek olan gelişmekte olan ülkelere kaydırması şeklinde tanımlanmakta, böylece bu ülkelerin “kirlilik cenneti” haline geldiği öne sürülmektedir (Grossman ve Krueger, 1991).

Kirlilik Cenneti Hipotezi literatürde ilk ortaya atıldığından bu yana, farklı dönemlerde ve çeşitli ülkelerde yapılan ampirik çalışmalarla incelenmiştir. Örneğin, Mike ve Kardaşlar (2018) 102 ülkede 2000-2015 dönemini kapsayacak şekilde yaptıkları çalışmada, düşük gelirli ülkelerde KCH'nin geçerli olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada düşük gelirli ülkelerin daha esnek çevre düzenlemelerine sahip olmaları ve buna bağlı olarak kirli endüstrilerin bu bölgelere kaymasının çevre kirliliğine yol açtığı sonucuna ulaşılmıştır. Buna karşın yüksek gelirli ülkelerde ise KCH'nin daha baskın olduğu belirlenmiştir. Zeren (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 1970-2010 döneminde ABD, Fransa ve İngiltere'de KCH'nin geçerli olduğu; Kanada'da ise KCH'nin kısmen desteklendiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, farklı ülkelerdeki çevre düzenleme politikaları ve ekonomik yapılarının, doğrudan yabancı yatırımlar (DYY) akışlarına ve dolayısıyla çevresel sonuçlara olan etkisini gözler önüne sermektedir.

Sonuç olarak kirlilik cenneti hipotezine göre, çevresel düzenlemelerin katılığı ve uygulama biçimi yatırımcıların stratejik kararlarında belirleyici rol oynamaktadır. Bu noktada kamu politikalarının önemi ortaya çıkmakta ve gelişmekte olan ülkelerin çevre standartlarını güçlendirmeleri, DYY'nin çevresel olumsuzluklarını minimize etmelerinin gerektiğini göstermektedir.

2.3.4. Antweiler, Copeland ve Taylor (ACT) Yaklaşımı

Antweiler, Copeland ve Taylor (2001) Yaklaşımı (ACT), dış ticaretin çevre üzerindeki etkilerini “ölçüm etkisi, bileşim (kompozisyon) etkisi ve teknik etki olmak üzere üç ana mekanizma üzerinden açıklamaktadır (Biabany Khameneh vd., 2021; Koçum ve Güneren Genç, 2023). Ölçüm etkisi, dış ticaretin ekonomik büyümeyi teşvik etmesiyle beraber üretim seviyelerinin ve enerji tüketiminin artması sonucu karbon emisyonlarının da yükselmesine yol açabileceğini savunmaktadır. Özellikle fosil yakıtların yoğun kullanıldığı sanayi sektörlerinde ürün ve hizmetlere olan talebin artması, ölçek ekonomilerinin oluşturduğu çevresel maliyetlerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu etki dış ticaretin büyümenin itici gücü olduğu durumlarda daha belirgin olmaktadır (Songur, 2022; Koçum ve Güneren Genç, 2023). Bileşim

etkisi, dış ticaretin yapısal niteliğinin çevresel sonuçlar üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Ülkeler ticaret yapıları doğrultusunda, üretim süreçlerinde emek-yoğun veya sermaye-yoğun malların üretiminde uzmanlaşabilmektedir. Loğoğlu (2017), emek-yoğun malların üretiminin karbon salınımını nispeten azaltıcı etkileri olabileceği, sermaye-yoğun üretimin ise karbon emisyonlarını artırabileceği çalışmaların mevcut olduğunu ve bu nedenle ülkelerin ticaret politikalarının sadece ekonomik büyüme ile değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da planlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Biabany Khameneh vd. (2021), teknik etkiyi dış ticaret yoluyla inovatif ve çevreci teknolojilerin ülkeler arasında transfer edilebilmesi olarak ifade etmektedirler. Ülkeler, ticaret sayesinde daha temiz üretim teknolojilerine ve enerji verimliliği sağlayan yeniliklere erişebilmektedir. Bu durum, üretim süreçlerinin çevresel performansını iyileştirerek karbon emisyonlarının azalmasına katkıda bulunmaktadır. Koçum ve Güneren Genç'e (2023) göre, küresel değer zincirlerine entegre olmak, karbon yoğunluk konverjansını desteklemekte ve çevre dostu üretim tekniklerinin yayılmasını hızlandırmaktadır.

Bu kapsamda ACT'ye göre gelişmekte olan ülkelerin emek-yoğun ve kirletici sektörlerde uzmanlaştığı; gelişmiş ülkelerin ise daha temiz teknolojiler üzerine yoğunlaştığı ifade edilmektedir. Ancak dış ticaretin çevre üzerindeki etkisinin ülkeler arası çevresel düzenlemelerdeki farklılıklara da bağlı olduğu unutulmamalıdır. Dolayısıyla dış ticaretin çevre üzerindeki etkisi yalnızca ekonomik değil aynı zamanda politik ve kurumsal yapılarla da yakından ilişkilidir.

Özetle dış ticaretin karbon emisyonları üzerindeki etkisini inceleyen Antweiler, Copeland ve Taylor Yaklaşımı ülke ekonomileri ile çevre arasındaki karmaşık ilişkiyi teorik olarak ortaya koymaktadır. Teknolojik etkiler, ölçek etkisi ve bileşim etkisi gibi mekanizmalar, ticaretin hem olumlu hem de olumsuz çevresel sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir. Literatürde, farklı dönem ve ülke örnekleri üzerinden gerçekleştirilen analizler, dış ticaretin çevresel sonuçlarının hem doğrudan hem de dolaylı yollardan belirlendiğini ortaya koymaktadır (Elmas, 2016; Loğoğlu, 2017; Biabany Khameneh vd., 2021; Songur, 2022; Koçum ve Güneren Genç, 2023). Bu açıdan ACT'ye göre, dış ticaretin karbon emisyonları üzerindeki etkisinin çok boyutlu olduğu hem ekonomik hem de çevresel perspektiflerden değerlendirilmesi gerektiği görülmektedir.

2.3.5. Negatif Dışsallıklar Teorisi ve Karbon Vergisi Yaklaşımı

Fosil yakıtların küresel enerji üretimindeki merkezi rolü, artan karbon emisyonları sorununu da beraberinde getirmiştir. Bu emisyonlar iklim değişikliği ve çevresel bozulma gibi ciddi problemlere yol açmakta ve dolayısıyla ekonomik politikaların ve düzenleyici mekanizmaların tartışma konusu haline gelmektedir.

Hotunluoğlu ve Tekeli (2007) ile Çakmak (2018)'e göre, fosil kaynakların kullanımına bağlı ortaya çıkan karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla uygulanabilecek politika önerileri, iktisadi teorilerin ortaya koyduğu “dışsallıkların internalizasyonu” prensibine dayanmaktadır. Bir faaliyetin yarattığı yan etkiler özellikle de toplumun genel refahını olumsuz etkileyenler “negatif dışsallık” olarak tanımlanmaktadır. Fosil yakıtların yan ürünleri olan karbon emisyonları bu kapsamda ele alınmaktadır; çünkü emisyonların neden olduğu çevresel ve ekonomik zararlar, bireysel tüketici ve üreticilerin kararlarında dikkate alınmamaktadır. Pigou'nun negatif dışsallıkları içselleştirme önerisine dayalı olarak geliştirilen çevre vergileri, piyasadaki başarısızlıkları düzeltmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu vergiler, emisyonların sosyal maliyetlerini fiyat mekanizmasına dahil ederek, kaynak kullanımının daha verimli ve çevre dostu hale gelmesini amaçlamaktadır. Çakmak (2018), özellikle karbon vergisinin, fosil yakıt tüketiminin yol açtığı sosyal maliyetlerin içselleştirilmesi açısından önemli bir araç haline geldiğini ifade etmektedir. Karbon vergisi şirket ve tüketicilerin karbon salınımının neden olduğu zararları ödemeleri gerekliliğini gündeme getirerek, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması konusunda piyasa sinyallerinin düzeltilmesine yardımcı olmaktadır. Ancak bazı çalışmalar bu verginin emisyon azaltıcı etkisinin yetersiz olabileceğini öne sürmektedir (Hotunluoğlu ve Tekeli, 2007).

Ekonomik kaygılar, fosil yakıt kullanımının sınırlandırılması ve karbon emisyonlarının azaltılmasında önemli bir araç olarak çevre politikalarının oluşturulmasına belirleyici olmaktadır. Bu bağlamda karbon vergisi gibi müdahaleler maliyet-fayda analizi kapsamında değerlendirildiğinde, çevresel hasarın azaltılmasına yönelik stratejik bir adım olarak öne çıkmaktadır (Uğur, 2014). Ancak karbon vergisinin uygulanması ve etkinliği konusunda literatürde (Kumbaroğlu vd., 2017; Polat ve Polat, 2018; Metcalf, 2019; Pretis, 2022; Karakaya vd., 2023; Meng ve Yu, 2023; Çelikkaya, 2024; Atılğan, 2025) farklı yaklaşımlar mevcuttur. Çalışmalar

vergileendirme mekanizmalarının etkinliğinin yanı sıra sadece vergileendirme üzerine odaklanmanın yetersiz kalabileceğini ve politika yapıcılarının daha bütüncül bir yaklaşım benimsemesi gerektiğini göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının teşvik edilmesi, fosil yakıt kullanımının azaltılması ve karbon emisyonlarının sınırlandırılması için önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Alptekin (2024), karbon vergisi ve yenilenebilir enerji teşviklerinin birlikte uygulanmasının, çevresel ve ekonomik yararları maksimize edebileceğini savunmaktadır. Bu ikili politika yaklaşımında karbon vergisi aracılığıyla fosil yakıt kullanımının maliyetleri yükseltilirken, yenilenebilir enerji destekleriyle alternatif enerji kaynaklarının cazibesi artırılmaktadır. Böylece piyasa mekanizması içerisinde fosil yakıtlara olan talep azalırken, çevresel etkilerin minimize edilmesi hedeflenmektedir. Ancak bu stratejinin başarılı olabilmesi için hem uygun vergi oranlarının belirlenmesi hem de yenilenebilir enerji sektörüne yönelik teşviklerin etkin bir şekilde tasarlanması gerekmektedir.

2.3.6. STIRPAT (Nüfus, Refah ve Teknolojinin Stokastik Etkileri) Modeli

STIRPAT modeli, ilk kez Ehrlich ve Holdren (1971) tarafından ortaya atılan ve Commoner ve arkadaşları (1971) tarafından çevresel etkinin nüfus, refah ve teknoloji unsurlarının çarpımıyla oluştuğunu savunan IPAT modelinin regresyon analizlerine göre uygun şekilde yeniden formüle edilmiş halidir (Painter ve Durham, 1995; Başoğlu, 2018). Model, doğrusal bir form ile tahmin yapmayı kolaylaştırmakta ve insan faaliyetleri ile çevresel etkiler arasındaki ilişkileri ve bu faktörlerin etkisini belirlemeye yardımcı olmaktadır (Wang vd., 2017). STIRPAT modeli, nüfus (P), refah düzeyi (A) ve teknoloji (T) bileşenleri üzerinden çevresel etkileri analiz etmek için geliştirilmiştir (Dietz ve Rosa, 1997). Model ilk olarak sadece nüfus, refah düzeyi ve teknolojik faktörler temel alınarak geliştirilmiş olsa da sonrasında STIRPAT'ın esnek yapısının kentleşme gibi çevresel etkilerle doğrudan ilişkili bir ara değişken ile kullanılabileceği; yani modelin genişletilebileceği belirtilmiştir (York vd., 2003). Bu genişletilmiş model kapsamında CO₂ emisyonları ile kentleşme arasındaki ilişki STIRPAT modeli yardımıyla literatürde (Fan vd., 2006; Shahbaz vd., 2015; Wang ve Zhao, 2015; Wang vd., 2018; Cheng ve Hu, 2023) birçok kez açıklanmaya çalışılmıştır.

Sonuç olarak kentleşme ile karbon emisyonları arasındaki ilişki ekonomik büyüme, çevresel etki ve sürdürülebilir kalkınma stratejileri açısından günümüzde

büyük önem taşımaktadır. Özellikle 19. yüzyıldan günümüze uzanan tarihsel süreçte kentleşme dinamikleri ve beraberindeki enerji tüketimi ile karbon salınımı, ekonomik dönüşümlerin ve teknolojik gelişmelerin etkisiyle yeni boyutlar kazanmıştır. Bu açıdan CO₂ emisyonlarını açıklamak için kentleşme değişkenine modellemelerde yer verilmesi kaçınılmazdır.

Çalışmanın bu bölümünde CO₂ emisyonları ve nedenleri, CO₂ emisyonları ile ilgili uluslararası anlaşmalar ile politikalar ve CO₂ emisyonları ile ilgili teorik yaklaşımlar açıklanmıştır. İzleyen literatür bölümünde ise CO₂ emisyonlarına neden olan faktörlerin incelendiği çalışmalara yer verilerek, mevcut araştırmalar ışığında kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır.





3. LİTERATÜR TARAMASI

Literatür incelendiğinde, karbon emisyonlarını etkileyen faktörler üzerine yapılan çalışmaların çoğunun karbon emisyonları ile fosil enerji tüketimi, yenilenebilir enerji tüketimi, enerji kaynakları, doğrudan yabancı yatırımlar, dış ticaret, ekonomik büyüme, finansal gelişme, kentleşme, sektörel yapı ve sanayileşme gibi faktörleri ele alan araştırmalar olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda söz konusu çalışmalar aşağıda kronolojik sıralama ile özetlenerek sunulmuştur.

Jiang ve Lu (2025) 2006-2019 dönemi için Guangzhou'daki bina sektörünün karbon zirvesine ulaşma sürecini, STIRPAT (Nüfus, Refah ve Teknoloji Üzerinden Regresyona Dayalı Stokastik Etkiler) modeliyle araştırmıştır. Ridge regresyon analizi ve F-testleri ile kentleşme oranı, toplam kapalı alan, hanehalkı enerji tüketim düzeyi, üçüncül sektörün katma değeri ve kamu alanları birim başına karbon emisyonlarının modelin temel belirleyicileri olduğu sonucuna ulaşmıştır. Çalışmaya göre, 2030 yılına kadar bina kaynaklı karbon emisyonlarının zirveye ulaşabilmesi için birim alan başına emisyonlarının her yıl en az %5 oranında azaltılması gerektiği tespit edilmiştir.

Hasanov vd. (2024) RECAI ülkelerinde yenilenebilir enerji kullanımı ile toplam faktör verimliliğinin, CO₂ emisyonlarının geleneksel belirleyicileri olan ekonomik büyüme, ihracat ve ithalatla birlikte CO₂ emisyonlarına etkilerini incelemişlerdir. 1990-2018 dönemi için RECAI kapsamında yer alan 20 ülke üzerinden gerçekleştirilen panel veri analiz yöntemleri sonucu yenilenebilir enerji kullanımı, toplam faktör verimliliği ve ihracat CO₂ emisyonlarını azaltıcı nitelikte olduğunu; ekonomik büyüme ve ithalatın CO₂ emisyonlarını artırdığını belirlemiştir.

Raghutla ve Kolati (2023) 1990-2020 dönemi için RECAI ülkelerinde yenilenebilir enerjinin ekolojik ayak izi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Panel veri analizleri sonucunda yenilenebilir enerji kullanımı ve dışa açıklığın çevresel yükü azalttığı görülürken; fosil enerji tüketimi ve ekonomik büyümenin ise artırıcı etki gösterdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle çevre politikalarının yenilenebilir enerji kullanımına yönelik olması gerektiğini savunmuşlardır.

Cheng ve Hu (2023) Çin'de 1997-2018 döneminde yaşanan kentleşme ve kentsel yayılmanın CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini, Genişletilmiş STIRPAT modeli kapsamında regresyon analizi ile incelemişlerdir. Regresyon sonuçlarına göre hem kentleşmenin hem de kentsel yayılmanın CO₂ emisyonlarını artırdığı sonucuna

ulaşılmıştır. Etki mekanizmalarının analizi, kentleşmenin sanayi, inşaat ve konut tüketimine bağlı CO₂ emisyonlarını artırarak toplam emisyonları yükselttiğini ortaya koymuştur. Benzer şekilde kentsel yayılmanın da ulaşım, inşaat ve sanayi sektörlerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını artırarak toplam emisyonlar üzerinde olumsuz etkide bulunduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca çalışmada Çin'in karbon azaltımı ve düşük karbonlu kalkınma hedeflerine yönelik çeşitli politika önerileri sunulmuştur.

Hao ve Chen (2023) E7 ülkelerinde 1990-2020 yılları arasındaki yıllık panel verileriyle, yenilenebilir enerji tüketimi ve yeşil inovasyonun CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini Dinamik En Küçük Kareler (DOLS), Tam Modifiye Edilmiş En Küçük Kareler (FMOLS), klasik eşbütünleşme regresyonu, Bayer-Hanck eşbütünleşme testi ve Dağıtılmış Gecikmeli Model (ARDL) sınır testleriyle araştırmışlardır. Analiz sonuçlarına göre yenilenebilir enerji tüketiminde meydana gelen %1'lik bir artış, CO₂ emisyonlarında sırasıyla %0,357, %0,428 ve %0,348 oranlarında azalmaya yol açmaktadır. Benzer şekilde finansal inovasyonda yaşanan %1'lik bir artış da CO₂ emisyonlarını sırasıyla %0,301, %0,336 ve %0,306 oranlarında azaltmaktadır. Buna karşılık ekonomik büyümede meydana gelen %1'lik bir artış, CO₂ emisyonlarını sırasıyla %0,881, %0,946 ve %0,875 oranlarında artırmaktadır. Enflasyondaki %1'lik bir artış da CO₂ emisyonlarını sırasıyla %0,015, %0,043 ve %0,022 oranlarında yükseltmektedir. ARDL sonuçları yenilenebilir enerji tüketimi ve finansal inovasyonun çevre kalitesini artırdığını, ekonomik büyüme ve enflasyonun ise çevresel bozulmayı hızlandırdığını tespit etmiştir. Yeşil inovasyonun ise uzun vadede etkisiz kaldığı, kısa vadede ise çevre kalitesini iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Ito ve Ali (2023), 1980-2018 dönemi için Hindistan'da nüfus artışı, doğal kaynakların tükenmesi, yenilenemeyen enerji tüketimi, milli gelir büyümesi, göçmen gönderileri ve sanayi üretiminin, karbondioksit (CO₂) emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. ARDL, FMOLS, DOLS ve Kanonik Eşbütünleşme Regresyonu (CCR) yöntemleriyle analizler gerçekleştirilmiştir. Uzun dönem ARDL sonuçlarına göre, nüfus artışı, milli gelir büyümesi ve yenilenemeyen enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını artıran anlamlı faktörler olduğu tespit edilirken; doğal kaynakların tükenmesi, sanayi üretimi ve göçmen gönderilerinin CO₂ emisyonları üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca araştırma dönemi için

Hindistan'da Çevresel Kuznets Eğrisi (ÇKE) hipotezinin geçerli olmadığı belirlenmiştir.

Karakurt ve Aydın (2023) BRICS (Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin, Güney Afrika) ve MINT (Meksika, Endonezya, Nijerya, Türkiye) ülkelerinde 1980-2020 dönemi için, fosil yakıt kaynaklı karbondioksit emisyonlarını tahmin etmeye yönelik regresyon modelleri geliştirmişlerdir. Mevcut fosil yakıt kullanımı ve emisyon durumu özetlenmiştir. Geliştirilen modeller determinasyon katsayısı, F ve t testleriyle ve tahmin doğrulukları ise Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) ile değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda önerilen modellerde yüksek doğruluk sağlandığı, BRICS ve MINT ülkelerinin gelecekte küresel ekonomi üzerinde belirleyici roller üstleneceği ve bu ülkelerde fosil yakıt kaynaklı karbondioksit emisyonlarında ciddi artışların beklendiği ortaya konmuştur.

Kartal (2023) ABD'de enerji üretim kaynaklarının CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini analiz ettiği çalışmada Ocak 1973-Nisan 2022 dönemine ait aylık verileri kullanarak Dinamik Otoregresif Dağıtılmış Gecikmeli Model (DYNARDL) simülasyonları gerçekleştirmiş; bulguların sağlamlığını test etmek için de Çekirdek Tabanlı Düzenleştirilmiş En Küçük Kareler (KRLS) ve Eşbütünleşme Regresyonu uygulamıştır. Analiz sonuçlarına göre enerji üretim bileşenleri ile CO₂ emisyonları arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisinin varlığı belirlenmiştir. Fosil ve nükleer enerji üretiminin hem kısa hem de uzun vadede CO₂ emisyonlarını artırdığı; yenilenebilir enerji üretiminin ise kısa vadede emisyonları artırdığı, ancak uzun vadede azalttığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Ayrıca fosil enerji üretimindeki pozitif (negatif) şokların CO₂ emisyonlarını artırdığı (azalttığı), yenilenebilir enerji üretimindeki pozitif (negatif) şokların ise CO₂ emisyonlarını azalttığı (artırdığı) sonucuna ulaşılmıştır.

Kong vd. (2023) karbon nötrlüğü hedeflerine ulaşmak için, Shandong Eyaleti'nde karbon emisyonlarını etkileyen faktörleri logaritmik ortalama Divisia endeksi (LMDI) yöntemi, Adaboost algoritması, senaryo analizi gibi çeşitli yöntemler ile analiz etmiş ve 2020-2050 dönemi için emisyon tahminleri yapmışlardır. Genişletilmiş STIRPAT modeli sonucunda 1998-2019 döneminde kentsel karbon emisyonlarını en çok ekonomik büyümenin, ardından enerji yapısı ve enerji tüketiminin etkilediğini belirlenmiştir. Ayrıca çalışma Shandong Eyaleti'nin karbon

emisyollarının 2030-2035 yılları arasında zirveye ulaşabileceğini, ancak bu sürecin gelişme senaryolarına göre değişebileceğini ortaya koymuştur.

Lin ve arkadaşları (2023) "çift karbon" hedefi çerçevesinde ekonomik büyüme ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki dengeyi sağlamada yeşil finansmanın rolünü araştırmışlardır. Çin'in 25 eyaletine ait 2007-2020 dönemi verileri kullanılarak karbon emisyon kaynakları enerji yapısı, ekonomik gelişme, enerji verimliliği ve sanayi yapısı olmak üzere dört gruba ayrılmış ve Logaritmik Ortalama Divisia Endeksi (LMDI) yöntemiyle iki aşamalı ayrıştırma analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yeşil finansman ile karbon emisyonları arasındaki doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkiler mekânsal analiz yöntemleriyle incelenmiştir. Çalışma sonucuna göre yeşil finansmanın karbon emisyonlarını azaltmada etkili olduğu ve bu etkinin enerji yapısının dönüşümü, enerji verimliliğinin artırılması ve sanayi yapısının iyileştirilmesiyle gerçekleştiği belirlenmiştir. Bununla birlikte karbon emisyonlarını etkileyen faktörlerde belirgin mekânsal farklılıklar ve doğrusal olmayan ilişkilerin de mevcut olduğu ifade edilmiştir.

Pata ve arkadaşları (2023) ASEAN (Güneydoğu Asya Uluslar Birliği) üyesi altı ülkede yenilenebilir enerji, turizm, gelir ve doğrudan yabancı yatırımlar değişkenlerinin karbon emisyonları üzerindeki eşzamanlı etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada 1995-2018 dönemi için panel ARDL ve Dumitrescu-Hurlin (DH) panel nedensellik testi uygulanmıştır. Analizler sonucunda, turizm faaliyetleri ve doğrudan yabancı yatırımların CO₂ emisyonlarını artırdığı; gelir artışı ve dışa açıklığın ise çevresel bozulmayı azalttığı bulgularına ulaşılmıştır. Uzun dönem gelir esnekliğinin kısa döneme göre daha düşük bulunduğu ve bu durumun Çevresel Kuznets Eğrisi (ÇKE) hipotezinin geçerliliğini desteklediği belirtilmiştir. Bununla birlikte yenilenebilir enerji tüketiminin yalnızca kısa vadede emisyonları azaltıcı etkisi olduğu, uzun vadede ise çevresel kalite üzerinde anlamlı bir etkisinin bulunmadığı, yenilenebilir enerji ile çevresel bozulma arasında anlamlı bir nedensellik ilişkisinin mevcut olmadığı belirlenmiştir.

Wei vd. (2023) Henan Eyaleti'nde tarım ve hayvancılık sektörlerinin ekonomik gelişimi ile karbon emisyonları arasındaki ilişki ve karbon emisyonlarını etkileyen faktörleri inceledikleri çalışmalarında 2000-2020 dönemine ait panel veri ile Tapio ayrıştırma modeli ve STIRPAT modelini birleştirilerek analizler gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlara göre, tarım ve hayvancılık gelişimi ile karbon emisyonları arasındaki

ilişkinin çoğunlukla güçlü ve zayıf ayrışma şeklinde olduğu belirlenmiştir. Karbon emisyon yoğunluğu ve işgücü etkisinin bu ilişkiyi optimize ettiği, kentleşme oranı ve kırsal hanehalkı tüketim harcamalarının karbon emisyonları üzerinde negatif etkide bulunduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık emisyon yoğunluğu ve tarımsal makine gücünün emisyonları artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Voumik vd. (2023) G7 ülkelerindeki elektrik ve ısı üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının, farklı enerji kaynakları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada 1971-2019 yılları arası veriler kullanılarak kuantil regresyon (QR), genelleştirilmiş momentler yöntemi (GMM), rasgele etkiler (RE) ve sabit etkiler (FE) yöntemleriyle analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda kömür ve gazlı enerji santrallerinin çevre üzerinde büyük negatif bir etki yarattığı, kömür santrallerinin diğer enerji kaynaklarına göre daha fazla çevresel etkiyi barındırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, hidroelektrik ve yenilenebilir enerji üretiminin CO₂ emisyonlarını azalttığı, nükleer enerjinin ise çevre üzerinde faydalı etkisi olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

Zeng ve Wang (2023), ölçek ekonomilerini temsilen düzeltilmiş gayrisafi yurtiçi hasıla, dışa açıklığı gösteren dış ticaret bağımlılık oranı, uluslararası yatırımları temsilen doğrudan yabancı yatırım oranı, sanayi yapısını gösteren sermaye-işgücü oranı, teknolojik gelişmeyi temsilen Ar-Ge yoğunluğu ve karbon emisyonlarının çevresel etkisini gösteren değişkenlerin CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çin'in Zhejiang eyaletine ait 1990-2020 dönemi zaman serisi verileri kullanılarak doğrusal regresyon, ARDL sınır testi, VAR analizi ve varyans ayrıştırması yöntemleri uygulanmasıyla; kısa dönemde dış ticaretin karbon emisyonlarını artırıcı ve istatistiksel olarak anlamlı bir etkide, sermaye-işgücü oranının etkisinin ise anlamlı olmadığı ve karbon emisyonlarının kendi dinamiklerinde gecikmeli ve negatif bir etkisinin olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Uzun dönemde ise tüm değişkenler ile karbon emisyonları arasında güçlü ve anlamlı ilişkilerin mevcudiyeti tespit edilmiştir.

Ahmed vd. (2022) 1990-2014 dönemine ait verileri kullanarak Çin ve Hindistan'da enerji tüketimi, finansal gelişme, gayri safi yurt içi hasıla, yenilenebilir enerji kullanımı ve nüfusun CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada makine öğrenmesi tabanlı Uzun Kısa Dönem Bellek (LSTM) yöntemi uygulanmış ve CO₂ emisyonlarını etkileyen en güçlü ve en zayıf faktörler

belirlenmiştir. Sonuçlara göre CO₂ emisyonlarını en fazla artıran faktör enerji tüketimi olurken, en düşük etkiye sahip değişkenin yenilenebilir enerji kullanımı olduğu tespit edilmiştir. Modelleme sürecinde yenilenebilir enerji katsayısı artırılıp enerji tüketimi katsayısı azaltıldığında, CO₂ emisyonlarında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Araştırmacılar Çin'de 2022'ye kadar yavaşlama, Hindistan'da 2023'e kadar azalma sağlanamayacağını öngörmüşlerdir. Çalışmada yenilenebilir kaynaklara geçişin ve kömür tüketiminin azaltılmasının, ekonomik büyümeyi olumsuz etkilemeden CO₂ emisyonlarını düşürebileceği vurgulanmıştır.

Chen vd. (2022) 1995-2015 döneminde 97 ülke için ekonomik büyüme ile yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları tüketiminin kişi başı CO₂ emisyonları üzerindeki doğrusal olmayan etkilerini dinamik panel eşik modeli ile test etmişlerdir. Araştırma sonucunda yenilenebilir enerji tüketimindeki artışın, yalnızca belirli bir eşik aşılması durumunda kişi başı CO₂ emisyonlarını azalttığı tespit edilmiş, bu bulgunun özellikle gelişmiş ülkeler ve güçlü kurumlara sahip ülkeler için geçerli olduğu ifade edilmiştir.

Dong vd. (2022) 32 gelişmiş ülke için 2000-2018 dönemi verileriyle yenilenebilir enerji tüketimi ve karbon emisyon verimliliği arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi incelemişlerdir. Karbon emisyon verimliliği, Süper Verimlilik Slack Tabanlı Ölçüm (SE-SBM) modeli kullanılarak hesaplanmış; yenilenebilir enerji tüketiminin emisyon verimliliği üzerindeki etkisi ise Etkileşimli Sabit Etkilerle Geliştirilmiş Panel Eşik Modeli (PTIFEs) ile test edilmiştir. Analizler sonucunda yenilenebilir enerji tüketiminin emisyon verimliliğini arttırdığı, enerji tüketim yoğunluğu arttıkça bu etkinin azaldığı ve finansal gelişme ile iyileştiği belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada yenilenebilir enerji tüketimi ile emisyon verimliliği arasındaki ilişkinin gelir seviyelerine göre farklılaştığı sonucuna ulaşılmıştır.

Kırıkkaleli vd. (2022) Şili'de 1990-2017 dönemi verileriyle finansal gelişme ve yenilenebilir enerji tüketiminin tüketim temelli CO₂ emisyonlarına etkisini ekonomik büyüme ve elektrik tüketimi kontrol değişkenleri kullanılarak analiz etmişlerdir. Çalışmada DOLS, ARDL, FMOLS ve yapısal kırılmaları belirlemek için Fourier Toda–Yamamoto nedensellik testi uygulanmıştır. Bulgular finansal gelişme ve yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını azalttığını; buna karşılık ekonomik büyüme ve elektrik tüketiminin emisyonları artırdığını göstermiştir.

Lei vd. (2022) 1991-2019 dönemi için Çin'deki enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki dinamik etkilerini doğrusal olmayan ARDL (Non-linear ARDL-NARDL) yöntemi ile test etmişlerdir. Çalışmada enerji verimliliğindeki negatif şokların uzun vadede CO₂ emisyonlarını artırdığı, ancak yenilenebilir enerji tüketimindeki pozitif şokların CO₂ emisyonlarını azalttığı sonuçlarına ulaşılrken; yenilenebilir enerji tüketimindeki negatif şokların ise uzun vadede emisyonları artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, kısa vadede enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji tüketimindeki pozitif şokların, CO₂ emisyonları üzerinde olumsuz yönde etkilerinin var olduğu belirlenmiştir.

Mentel vd. (2022) çalışmalarında, 2000-2015 döneminde Sahra Altı Afrika'daki 44 ülkeye ait verileri kullanarak sanayileşme ile karbon emisyonları arasındaki ilişkide yenilenebilir enerjinin aracı rolünü incelenmiş ve yapısal dönüşümleri dikkate alarak ÇKE hipotezini test etmişlerdir. İki Aşamalı Sistem Genelleştirilmiş Momentler Yöntemi (Two-Step System GMM) kullanılarak sanayi payının karbon emisyonlarını artırdığı, yenilenebilir elektrik üretiminin ise emisyonları azalttığı belirlenmiştir. Yenilenebilir elektrik üretimindeki her %1'lik artışın karbon emisyonlarını %0,22 oranında düşürdüğü ve yenilenebilir enerji sektörünün sanayileşmenin neden olduğu emisyonlar üzerindeki olumsuz etkisini hafiflettiği, kişi başı gelir ile karbon emisyonları arasında ters U şeklinde bir ilişki bulunarak ÇKE hipotezi doğrulandığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Rahaman vd. (2022) çalışmalarında, 1990-2019 dönemi verilerini kullanarak Bangladeş'te doğrudan yabancı yatırımlar (DYY), turizm, elektrik tüketimi ve ekonomik kalkınmanın CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Uzun dönem analiz sonuçlarına göre: DYY, elektrik tüketimi ve ekonomik kalkınmanın CO₂ emisyonlarını artırdığı, turizmin ise emisyonları azalttığı belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen GSYİH'nin karesinin negatif etkisi ise ÇKE hipotezinin Bangladeş için geçerli olduğunu doğrulamıştır. Kısa dönemde yalnızca DYY'nin emisyonlar üzerinde negatif etkisi anlamlı iken, diğer değişkenlerin etkisi ise anlamlı bulunamamıştır. Ayrıca çalışma, hata düzeltme modeli sonuçları sistemin yaklaşık %60 oranında dengeye geldiğini, Granger nedensellik analizi ile ise bazı değişkenler arasında tek yönlü nedensellik ilişkilerin mevcut olduğunu ortaya koymaktadır.

Xu vd. (2022) Çin'in farklı bölgelerinde lojistik sektörüne bağlı karbon emisyonlarını 2010-2020 verileri kullanılarak analiz etmişlerdir. Emisyonları

etkileyen faktörler Logaritmik Ortalama Divisia Endeksi (LMDI) yöntemiyle ayrıştırılırken; emisyonlar ile lojistik sektör gelişimi arasındaki ilişki çözülme analizi ile test edilmiştir. Sonuçlar karbon emisyonlarının doğu bölgelerinde en yüksek seviyeye ulaştığını ve ekonomik gelişmişliğin emisyonları artıran başlıca faktör olduğunu göstermiştir. Lojistik sektöründeki gelişmenin başlangıçta emisyonları artırdığı, ancak zamanla bu etkinin azaldığı belirlenirken; enerji yoğunluğunun etkisinin ise bölgeler arasında dalgalı olduğu, enerji yapısının genellikle negatif ancak istatistiksel olarak anlamlı olmayan bir etkide bulunduğu belirlenmiştir. Çözülme analizleri ise yalnızca üç eyalette güçlü çözülme sağlandığını, diğer eyaletlerde ise zayıf çözülme eğilimlerinin hâkim olduğunu göstermektedir.

Tutak ve Brodny (2022) AB ülkelerinde 2000-2019 döneminde yenilenebilir enerji kullanımının ekonomik göstergeler, sera gazı emisyonları ve geleneksel enerji tüketimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, ülkeler arasındaki yenilenebilir enerji tüketimindeki benzerlikleri belirlemek için Kohonen yapay sinir ağları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda yenilenebilir enerji tüketiminin ekonomik büyüme, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve geleneksel enerji tüketiminin düşürülmesi üzerinde olumlu bir etkisinin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada eski ve yeni AB ülkeleri arasında yenilenebilir enerji kullanımında önemli farkların mevcut olduğu ve eski AB ülkelerinde bu etkinin daha çok belirgin gözlemlendiği sonucuna ulaşılmıştır.

Yu vd. (2022) gelişmekte olan ülkelere 2001-2019 döneminde enerji yoksulluğu, yenilenebilir enerji tüketimi, kişi başı gelir, doğal gaz kullanımı ve ticaret serbestisinin CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Panel kantil regresyon yöntemi ile elde edilen bulgular, Sürdürülebilir Kalkınma Amacı 7'nin (SDG7) başarılabilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılabilmesi için öncelikle enerji yoksulluğunun giderilmesi gerektiğini ortaya koyarken; yenilenebilir enerji kullanımı, ekonomik büyüme ve ticaret serbestisinin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli araçlar olduğunu belirtmektedir.

Acheampong vd. (2021) Sahra Altı Afrika'daki 45 ülkenin 1960-2017 dönemindeki verilerini kullanarak, kurumsal kalite ve isteklilik, ekonomik büyüme, karbon emisyonları ve yenilenebilir enerji kullanımı arasındaki zamansal nedensellik ilişkilerini araştırmışlardır. Genelleştirilmiş Momentler Yöntemi ile Panel Vektör Otoregresyon (GMM-PVAR) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizler ile,

kurumsal kalite ve isteklilik ile ekonomik büyüme arasında nedensellik ilişkisinin olmadığı; yenilenebilir enerji kullanımı ile ekonomik büyüme arasında çift yönlü bir ilişkinin olduğu; ekonomik büyümenin karbon emisyonlarını artırdığı, kurumsal kalite ve istekliliğin ise karbon emisyonlarına ve yenilenebilir enerji kullanımına tepki verdiği sonuçları ortaya konmuştur. Çalışmada ayrıca karbon emisyonları ile yenilenebilir enerji kullanımı arasında doğrudan bir nedensellik ilişkisinin mevcut olmadığı ve bu ilişkilerin ülkelerin kurumsal kökenlerine göre farklılıklar sergilediği belirtilmektedir.

Bakay ve Ağbulut (2021) Türkiye’de 1990-2018 dönemi için elektrik üretim sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarını derin öğrenme (DL), destek vektör makineleri (SVM) ve yapay sinir ağları (ANN) algoritmaları ile tahmin etmişlerdir. Analizler sonucunda tüm algoritmaların yüksek doğruluk sağladığı; özellikle derin öğrenme algoritmasının %99,8 R^2 değeri ile en başarılı sonucu verdiği belirlenmiştir.

Çıtak vd. (2021) 1997-2017 dönemi için Non-linear otoregresif dağıtılmış gecikmeli model (NARDL) ile ABD'nin en kalabalık 10 eyaletinde yenilenebilir enerji ve doğalgaz tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki asimetric etkisini incelemişlerdir. Çalışmada gerçekleştirilen eşbütünleşme testi sonuçlarına göre, yenilenebilir enerji ile doğalgaz tüketiminin, incelenen sekiz eyalette CO₂ emisyonlarıyla uzun vadede anlamlı bir ilişki içinde olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, bu iki enerji türünün CO₂ emisyonları üzerindeki uzun dönemli etkilerinin eyaletler arası farklılıklar sergilediği tespit edilmiştir.

Hacımamoğlu ve Sandalcılar (2021) çalışmalarında, 1990-2016 yılları arasında RECAI kapsamında yer alan 35 ülkenin yenilenebilir ve yenilenemez enerji tüketimi ile ekonomik istikrar arasındaki ilişki incelemişlerdir. Ülkeler gelişmiş (19 ülke) ve gelişmekte olan (16 ülke) olarak sınıflandırılmış, panel nedensellik testleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda gelişmiş ülkelerde yenilenebilir enerji tüketiminden ekonomik istikrara ve ekonomik istikrardan yenilenemez enerji tüketimine doğru tek yönlü bir nedensellik ilişkisi bulunmuştur. Çalışma sonucunda gelişmiş ülkeler için "büyüme" ve "koruma" hipotezleri geçerli sayılmıştır. Gelişmekte olan ülkelerde ise ekonomik istikrar ile enerji tüketimi arasında anlamlı bir ilişki saptanamamış ve "yansızlık" hipotezinin geçerli olduğu belirlenmiştir.

Karimi vd. (2021) İran'da 1975-2017 dönemi için yenilenebilir enerji tüketimi, ekonomik büyüme ve karbon emisyonları arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Eşbütünleşme ilişkisinin test edilmesinde sınır testi yaklaşımına dayalı NARDL yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada, yenilenebilir enerji tüketimi ve karbon emisyonlarındaki artışın kişi başı GSYİH'yi uzun vadede artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Kısa vadede ise bu değişimlerin büyüme üzerinde belirgin olumsuz bir etkisi bulunmamıştır. İran'ın enerji portföyündeki yenilenebilir kaynakların sınırlılığı bu sonuçlarla ilişkilendirilmiştir.

Kwakwa (2021) Gana'nın ekonomik büyüme hedefleri kapsamında 1971-2014 dönemi için Dünya Bankası verileri kullanılarak, gelir artışı, elektrik tüketimi ve elektrik krizlerinin CO₂ emisyonları üzerindeki etkileri ARDL ve FMOLS yöntemleri ile analiz edilmiştir. Sonuçlar ÇKE hipotezinin Gana için geçerli olduğunu göstermiştir. Elektrik tüketiminin emisyonlar üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmazken, elektrik krizlerinin emisyonları artırdığı belirlenmiştir. Sanayileşme ve finansal gelişmişlik de emisyon artışına katkı sağlamaktadır. Çalışma, Gana'nın çevre politikalarında ÇKE temelli stratejiler geliştirmesini önermektedir.

Li ve Haneklaus (2021) 1990-2020 dönemi için Çin'de fosil yakıt tüketimi, yenilenebilir enerji, kentleşme, ekonomik büyüme ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Çalışmada ÇKE hipotezi kapsamında ARDL modeli uygulanmıştır. Sonuçlar CO₂ emisyonları ile kişi başına GSYİH arasında ters U şeklinde bir ilişki olduğunu göstermektedir. Fosil yakıt tüketimindeki %1'lik artışın, uzun vadede CO₂ emisyonlarını %0,235 oranında artırdığı belirlenmiştir. Buna karşılık, yenilenebilir enerji tüketimindeki %1'lik artışın uzun vadede CO₂ emisyonlarını %0,259 oranında azalttığı saptanmıştır. Ancak kısa vadede yenilenebilir enerji sektöründeki hızlı gelişimin CO₂ emisyonlarını artırdığı ve %1'lik yenilenebilir enerji tüketimi artışının CO₂ emisyonlarını %0,285-%0,288 oranında yükselttiği bulunmuştur. Kentleşmenin ise uzun vadede azaltıcı, kısa vadede ise artırıcı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Magazzino vd. (2021) Hindistan, Çin ve ABD'de güneş ve rüzgâr enerjisi üretimi, kömür tüketimi, GSYİH ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişki makine öğrenmesi metodu olan D2C (Causal Direction from Dependency) algoritmasıyla analiz etmişlerdir. Analizler için değişkenlerin ABD için 1983-2017, Hindistan için 1986-2017, Çin için ise 1990-2017 dönemlerine ait veri setleri kullanılmıştır. Çalışma

sonucunda Hindistan'da CO₂ emisyonlarında azalma yerine bir artış gözlemlenirken, Çin ve ABD'nin sürdürülebilirlik açısından Hindistan'dan daha umut verici olduğu belirtilmiştir.

Ren vd. (2021) çalışmalarında, Çin'in sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşabilmesi için çelik sektöründeki karbon emisyonlarını etkileyen temel faktörleri incelemişlerdir. Nüfus, refah ve teknoloji üzerinden odaklı STIRPAT modeli kullanılarak ekonomik büyüme, doğrudan yabancı yatırımlar ve karbon emisyonlarına ilişkin oluşturulan modeller, üç aşamalı en küçük kareler (3SLS) yöntemiyle incelenmiştir. Çalışmada ülke genelinde ve Batı bölgesinde bu üç değişken arasında çift yönlü nedensellik ilişkisi bulunurken; Doğu ve Orta bölgelerde ise ilişkinin sınırlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca Orta bölgede karbon emisyonları ile DYY arasında çift yönlü nedensellik ilişkisi bulunurken; Doğu bölgesi için bu ilişki tespit edilememiştir.

Türkoğlu (2021) Çin'de 1971-2019 dönemi için karbondioksit emisyonu, ekonomik büyüme ve enerji tüketimi arasındaki nedensellik ilişkisini araştırmıştır. Çalışmada, uzun dönemli ilişkileri tespit etmek için JJ Eşbütünleşme Analizi (Johansen-Juselius Cointegration Test) kullanılmıştır. Analizler sonucunda CO₂ emisyonunun hem ekonomik büyüme hem de enerji tüketimi ile uzun vadede anlamlı bir ilişki içinde olduğu belirlenmiştir. Kısa dönemli nedensellik ilişkilerini incelemek için ise Granger Nedensellik Testi uygulanmış ve ekonomik büyümeden enerji tüketimi ve CO₂ emisyonuna doğru, enerji tüketiminden ise CO₂ emisyonuna doğru %5 anlamlılık düzeyinde tek yönlü bir nedensellik ilişkisi tespit edilmiştir. Ayrıca çalışma Etki-Tepki Analizleri uygulayarak, ekonomik büyümenin enerji tüketimi ve CO₂ emisyonuna; enerji tüketiminin ise CO₂ emisyonuna pozitif etkide bulunduğunu belirlemiştir.

Wang vd. (2021) çalışmalarında, 2005-2014 döneminde düşük ve orta gelirli 64 ülkeyi inceleyerek, yenilenebilir enerji kullanımı ve çevresel sürdürülebilirlik notlarının ÇKE ve Kirlilik Cenneti Hipotezi üzerindeki etkilerini panel veri analizi yöntemi kullanarak araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre, kişi başı GSYİH ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişki ters S şeklinde olup, yenilenebilir enerji kullanımı ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişki orta gelirli ülkelerde ters N, düşük gelirli ülkelerde ise V şeklindedir. Yabancı yatırımların CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi orta gelirli ülkelerde N eğrisi, düşük gelirli ülkelerde ise pozitif yönlüdür. Ayrıca,

düşük gelirli ülkelerde çevresel sürdürülebilirlik notu yüksek olan ülkelerin yatırım çekme kapasitesinin arttığı, orta gelirli ülkelerde ise yatırım çekebilmek için kirliliğin sınırlı düzeyde artırılmasının gerekli olduğu belirlenmiştir.

Kırman ve Kesbiç (2020) seçili 11 ülke için 1980-2014 döneminde panel veri analiziyle kişi başına gelir ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Değişkenlerin durağanlığı genişletilmiş CADF (Covariate Augmented Dickey-Fuller) birim kök testi ile sınanırken; uzun dönemli ilişki Gengenbach, Urbain ve Westerlund Panel Eşbütünleşme Testi (GUW) ile belirlenmiş ve Dinamik En Küçük Kareler Ortalama Grup Tahmincisi (DOLSMG) ile katsayı tahmini yapılmıştır. Sonuçlar gelir ve çevresel kirlilik arasında ters N şeklinde bir ilişki olduğunu göstermiştir.

Musah vd. (2020) Batı Afrika ülkelerinde panel veri analiz yöntemleriyle 1990–2018 yılları arasında yenilenebilir enerji tüketimi ile karbon emisyonları arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Batı Afrika ülkelerinde yenilenebilir enerji ile CO₂ emisyonları arasında bir geri bildirim nedensel ilişkisinin var olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Appiah vd. (2018) seçili yükselen ekonomilerin potansiyel karbon dioksit (CO₂) emisyonlarının tahmini amacıyla tam bağlantılı iki katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı modeli kullanmışlardır. Modelde gizli katmanda tanjant aktivasyon fonksiyonu ve çıktı katmanında doğrusal fonksiyon tercih edilirken, eğitim sürecinde Levenberg-Marquardt (LM) algoritması uygulanmıştır. Girdi değişkenleri olarak bitkisel üretim, hayvansal üretim, ithalat, ihracat, ekonomik büyüme, yenilenebilir ve yenilenemez enerji tüketimi dikkate alınmıştır. 1971-2013 dönemi Dünya Kalkınma Göstergeleri ve FAOSTAT verileri kullanılarak gerçekleştirilen analizde, modelin ortalama kare hatasının (MSE) 0,0003345 seviyesine ulaştığı ve hata oranlarının %0,05'in altında kaldığı belirlenmiştir. Sonuçlar geliştirilen yapay sinir ağı modelinin yükselen ekonomiler için gelecekteki CO₂ emisyonlarını yüksek doğrulukla tahmin edebildiğini göstermektedir.

Benli ve Peker (2018) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye’de elektrik tüketimi, CO₂ emisyonu ve kişi başına düşen GSYİH arasındaki ilişki 1960-2013 dönemi için incelenmiştir. Eşbütünleşme analizi ve Granger nedensellik testi ile yapılan analizler sonucunda enerji tüketimi ve CO₂ emisyonu arasında eşbütünleşme ilişkisi bulunurken; CO₂ emisyonu ile kişi başı GSYİH arasında ve elektrik tüketimi ile kişi başı GSYİH arasında eşbütünleşme ilişkisi bulunamamıştır. Ayrıca elektrik

tüketimi ile kişi başı GSYİH arasında ve CO₂ emisyonu ile kişi başı GSYİH arasında nedensellik ilişkisi tespit edilmiştir. Çalışmada, hem CO₂ emisyonunun hem de elektrik tüketiminin GSYİH'nin nedeni olduğu belirlenmiştir.

Inglesi-Lotz ve Dogan (2018) çalışmalarında, 1980-2011 döneminde Afrika'nın Sahra Altı bölgesindeki en büyük on elektrik üreticisi için CO₂ emisyonlarının belirleyicilerini incelemişlerdir. Çalışmada yenilenebilir ve yenilenemez enerji tüketimi, gelir ve ticari açıklık gibi değişkenler ele alınmış ve ülkeler arası bağımlılığı dikkate alan panel tahmin yöntemleri kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre yenilenemez enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını artırdığı, yenilenebilir enerji tüketiminin ise azaltıcı bir etki gösterdiği bulunmuştur. Değişkenler arasında uzun vadeli bir ilişki tespit edilmiştir. Nedensellik analizinde CO₂ emisyonları, gelir, ticaret ve yenilenemez enerji tüketiminin yenilenebilir enerji tüketimini etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca yenilenemez enerjiden emisyonlara ve emisyonlar ile yenilenemez enerjiden ticarete doğru nedensellik olduğu ortaya konmuştur.

Liu ve Bae (2018) tarafından Çin için 1970-2015 döneminde gerçekleştirilen çalışmada, ARDL sınır testi, Johansen-Juselius eşbütünleşme testi ve vektör hata düzeltme modeli (VECM) yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre toplam enerji tüketimindeki yenilenebilir enerjinin payı arttıkça kısa dönemde CO₂ salımının azaldığı, ancak uzun dönemde yenilenebilir enerjinin CO₂ salımı üzerinde bir etkisinin bulunmadığı belirlenmiştir.

Pata ve Yurtkuran (2018) Türkiye'de 1981-2014 dönemini kapsayan çalışmalarında nüfus yoğunluğu, yenilenebilir enerji tüketimi, finansal gelişme, gelir ve CO₂ emisyonu arasındaki ilişkileri ÇKE hipotezi kapsamında ARDL sınır testi yardımıyla değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda finansal gelişme, nüfus yoğunluğu ve ekonomik büyümenin CO₂ emisyonunu arttırdığı, yenilenebilir enerji kullanımının çevresel sürdürülebilirlik üzerinde olumlu bir etkisi olduğu belirlenmiştir.

Sancar ve Polat (2018) G7 ülkelerinde 1980-2011 döneminde karbondioksit emisyonu, enerji tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkileri test etmişlerdir. Panel veri seti kullanılarak panel birim kök, panel eşbütünleşme ve panel nedensellik testleri uygulanmış, analizler sonucunda değişkenlerin düzeyde durağan olmadığı ancak uzun dönemde eşbütünleşik olduğu belirlenmiştir. Ayrıca G7 ülkelerinde CO₂

emisyonu ile GSYİH ve enerji tüketimi ile GSYİH arasında çift yönlü nedensellik ilişkisi tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar G7 ülkelerinde enerji verimliliğinin artırılmasının teknolojik gelişmelerle desteklenmesi ve çevre dostu ortak politika planlarının önceliklendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Şimşek ve Yiğit (2017) BRİCT ülkelerinde (Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin ve Türkiye) karbon emisyonları, yenilenebilir enerji tüketimi, kentleşme, kişi başına düşen reel gayrisafi yurtiçi hasıla ve petrol fiyatları arasındaki ilişkiyi Panel VAR analizi ile incelemişlerdir. 1990-2015 dönemi için Dumitrescu-Hurlin analizine göre, GSYİH ile kentleşme, petrol fiyatları, yenilenebilir enerji ve karbon emisyonları arasında tek yönlü nedensellik ilişkisi tespit edilmiştir.

Begüm vd. (2015) Malezya'da GSYİH büyümesi, nüfus artışı ve enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki dinamik etkilerini ekonometrik yaklaşımlar kullanarak incelemişlerdir. 1970-1980 döneminde kişi başı CO₂ emisyonlarının, kişi başı GSYİH ile birlikte azaldığı ancak 1980-2009 dönemi boyunca kişi başı GSYİH arttıkça emisyonların keskin bir şekilde arttığı bulunmuştur. Bu bulgular Sasabuchi–Lind–Mehlum U (SLM U testi) ve Dinamik En Küçük Kareler (DOLS) testleriyle desteklenmiştir. Çalışma ÇKE hipotezinin bu dönemde Malezya için geçerli olmadığını ortaya koymuştur. Ayrıca kişi başı GSYİH ve kişi başı enerji tüketiminin uzun vadede CO₂ emisyonları üzerinde pozitif etkileri olduğu ancak nüfus artış hızının emisyonlar üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı görülmüştür. Buna göre uzun vadede ekonomik büyümenin Malezya'daki CO₂ emisyonlarını artırabileceği ve yenilenebilir enerji gibi düşük karbon teknolojilerinin dönüşümünün, emisyonları azaltarak uzun vadeli ekonomik büyümeyi sürdürebileceği önerilmiştir.

Shahbaz vd. (2015) Malezya'da kentleşmenin enerji tüketimi üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında 1970:Q1-2011:Q4 dönemine ait verilerle STIRPAT modelini test etmişlerdir. Değişkenlerin bütünleşme özelliklerini ve uzun dönemli ilişkileri test etmek için Birim Kök Testi ve ARDL (Oto-regresif Dağıtılmış Gecikme) sınır testi kullanılmıştır. Sonuçlar kentleşmenin enerji tüketimini artıran önemli bir faktör olduğunu göstermektedir. Refah düzeyi ve sermaye stokunun enerji talebini yükselttiği, ticari açıklığın da refahı artırarak dolaylı yoldan enerji tüketimini artırdığı belirlenmiştir. Nedensellik analizine göre kentleşme enerji tüketimini etkilemektedir. Enerji tüketimi ile refah ve enerji tüketimi ile sermaye arasında çift yönlü bir ilişki

tespit edilmiştir. Ayrıca ticari açıklık ve enerji tüketimi arasında çift yönlü nedensellik gözlemlenmiştir.

Wang ve Zhao (2015) çalışmalarında, 1997-2012 döneminde Çin'in 30 eyalet düzeyindeki idari biriminde enerjiye bağlı CO₂ emisyonlarını etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Bölgeler kişi başına GSYİH düzeyine göre yüksek, orta ve düşük gelişmişlik düzeyine sahip olarak üçe ayrılmıştır. STIRPAT modeli kapsamında ve kümelenme analizi (k-means clustering), çoklu bağlantısallık testi (VIF) ve kısmi en küçük kareler regresyonu (PLS regression) analiz yöntemleri ile nüfus, ekonomik düzey, teknoloji seviyesi, kentleşme, sanayileşme ve dış ticaret gibi değişkenlerin emisyonlar üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, enerji yoğunluğunun etkisi en fazla yüksek gelişmişlik düzeyine sahip bölgelerde gözlemlenmiştir. Buna karşın kentleşme, sanayi yapısı ve dış ticaretin etkisi düşük gelişmişlik düzeyindeki bölgelerde daha belirgin olmuştur. Nüfus ve kişi başına düşen GSYİH ise gelişmekte olan bölgelerde karbon emisyonları üzerinde diğer bölgelere göre daha fazla etki göstermektedir.

Wu vd. (2015) çalışmalarında, 2004-2010 döneminde BRICS ülkelerinde (Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin, Güney Afrika) enerji tüketimi, ekonomik büyüme, kentsel nüfus ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi, çok değişkenli gri modelle incelenmişlerdir. Bulgular ekonomik büyümenin Brezilya ve Rusya'da CO₂ emisyonlarını azalttığını, Hindistan, Çin ve Güney Afrika'da ise arttırdığını göstermektedir. Ayrıca tüm BRICS ülkelerinde kentsel nüfus ve enerji tüketimi arttıkça emisyonların da artacağı öngörülmüştür. Buna göre Çin'in CO₂ emisyonlarındaki artış hızı en yüksek, Rusya ve Güney Afrika'nın ise en düşük bulunmuştur.

Bölük ve Mert (2014)'in 1990-2008 dönemi için 16 AB ülkesinde karbon emisyonları, gelir ve enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi ÇKE hipotezi çerçevesinde inceledikleri çalışmada, açıklayıcı değişkenler arasındaki çoklu doğrusal bağıntı problemi çözülerek panel veri analizi yapılmıştır. Çalışmanın önemli katkısı, yenilenebilir enerji tüketimi ile fosil yakıt enerji tüketiminin ayrılarak ÇKE hipotezinin test edilmesidir. Ancak, ÇKE hipotezi, 16 AB ülkesinde karbon emisyonları için geçerli olmamıştır. Bir diğer önemli bulgu, yenilenebilir enerji tüketiminin, fosil enerji tüketimine göre sera gazı (GHG) emisyonları açısından birim enerji başına yarı yarıya daha az katkı sağladığıdır. Bu da enerji tüketiminde

yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelmenin GHG emisyonlarını azaltabileceğini göstermektedir.

Cowan vd. (2014) 1990-2010 dönemi için BRICS ülkelerinde ekonomik büyüme, elektrik tüketimi ve CO₂ emisyonları arasındaki nedensellik ilişkisini incelemişlerdir. Elektrik ve GSYİH arasındaki ilişki, Rusya'da geri besleme, Güney Afrika'da koruma hipotezini desteklerken, Brezilya, Hindistan ve Çin'de nötralite hipotezi geçerli olmuştur. GSYİH ile CO₂ emisyonları arasında Rusya'da geri besleme, Güney Afrika'da tek yönlü nedensellik ve Brezilya'da ters ilişki bulunmuş, Hindistan ve Çin'de ise nedensellik tespit edilmemiştir. Hindistan'da elektrik tüketimi CO₂ emisyonlarını etkilerken, diğer ülkelerde bu ilişki gözlemlenmemiştir.

Shafiei ve Salim (2014) 1980-2011 dönemi için OECD ülkelerinde CO₂ emisyonlarının belirleyicilerini STIRPAT modeli kapsamında birim kök, panel eşbütünleşme ve Granger nedensellik testleri yardımıyla incelemişlerdir. Yenilenemez enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını artırdığı, yenilenebilir enerji tüketiminin ise bu emisyonları azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca kentleşme ile CO₂ emisyonları arasında ÇKE'nin varlığı desteklenmiş ve yüksek kentleşme seviyelerinde çevresel etkinin azaldığı bulunmuştur. Sonuçlar politika yapıcılarının hem kentsel planlamaya hem de temiz enerji geliştirmeye odaklanarak, yenilenemez enerji kullanımını azaltmaya ve iklim değişikliğiyle mücadeleye önemli katkılar sağlaması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Lean ve Smyth'in çalışmalarında (2010) 1980-2006 dönemi için beş ASEAN ülkesi üzerinde CO₂ emisyonları, elektrik tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki nedensellik ilişkisi panel vektör hata düzeltme modeli ile analiz edilmiştir. Uzun dönem tahminleri, elektrik tüketimi ile emisyonlar arasında pozitif bir ilişki ve emisyonlar ile reel çıktı arasında Çevresel Kuznets Eğrisi'ne uygun doğrusal olmayan bir ilişki olduğunu göstermektedir. Granger nedensellik testleri uzun vadede elektrik tüketimi ve emisyonlardan ekonomik büyümeye doğru tek yönlü nedensellik olduğunu ve kısa vadede emisyonlardan elektrik tüketimine doğru da tek yönlü bir nedensellik ilişkisi bulunduğunu ortaya koymaktadır. Tablo 3.1'de literatür taramasının özet tablosu sunulmuştur.

Tablo 3.1. Literatür Taraması Özet Tablosu

Yazar	Ülke-Bölge	Dönem	Amaç	Yöntem	Sonuç
Jiang ve Lu (2025)	Guangzhou	2006-2019	Bina sektörünün karbon zirvesine ulaşma sürecini, STIRPAT modeliyle araştırmaktır.	Ridge Regresyon Analizi ve F-Testleri	Kentleşme oranı, toplam kapalı alan, hanehalkı enerji tüketim düzeyi, üçüncül sektörün katma değeri ve kamu alanları birim başına karbon emisyonlarının modelin temel belirleyicileri olduğu sonucuna ulaşmıştır.
Hasanov vd. (2024)	RECAI	1990-2018	Yenilenebilir enerji kullanımı, toplam faktör verimliliğini CO ₂ emisyonlarının geleneksel belirleyicileri olan ekonomik büyüme, ihracat ve ithalat ile birlikte araştırarak CO ₂ emisyonlarına etkilerini incelemektir.	Panel Veri Analizi	Yenilenebilir enerji kullanımı, toplam faktör verimliliği ve ihracat CO ₂ emisyonlarını azaltıcı nitelikteyken; ekonomik büyüme ve ithalatın CO ₂ emisyonlarını artırdığı belirlenmiştir.
Raghutla ve Kolati (2023)	RECAI	1990-2020	RECAI ülkelerinde yenilenebilir enerjinin ekolojik ayak izi üzerindeki etkisini araştırmaktır.	Panel Veri Analizi	Yenilenebilir enerji kullanımı ve dışa açıklığın çevresel yükü azalttığı görülürken; fosil enerji tüketimi ve ekonomik büyümenin ise artıncı etki gösterdiği tespit edilmiştir.
Cheng ve Hu (2023)	Çin	1997-2018	Kentselleşme ve kentsel yayılmanın CO ₂ emisyonuna etkilerini genişletilmiş STIRPAT kapsamında incelemektir.	Regresyon Analizi	Kentleşmenin sanayi, inşaat ve konut tüketimine bağlı olarak CO ₂ emisyonlarını artırdığı, kentsel yayılmanın ise ulaşım, inşaat ve sanayi sektörlerinden kaynaklanan CO ₂ emisyonlarını artırarak toplam emisyonlar üzerinde olumsuz etki yaptığı tespit edilmiştir.
Hao ve Chen (2023)	E7 ülkeleri	1990-2020	Yenilenebilir enerji ve yeşil inovasyonun CO ₂ üzerindeki etkisini araştırmaktır.	FMOLS, DOLS, Klasik Eşbütünleşme Regresyonu, Bayer-Hanck Eşbütünleşme Testi, ARDL Sınır Testleri	Yenilenebilir enerji tüketimi ve finansal inovasyonun CO ₂ emisyonlarını azalttığı, ekonomik büyüme ve enflasyonun emisyonları artırdığı tespit edilmiştir. Yeşil inovasyon uzun vadede etkisiz kalırken, kısa vadede çevre kalitesini iyileştirmektedir.
Ito ve Ali (2023)	Hindistan	1980-2018	Nüfus artışı, doğal kaynakların tükenmesi, yenilenemeyen enerji tüketimi, milli gelir büyümesi, göçmen gönderileri ve sanayi üretiminin CO ₂ emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmaktır.	ARDL, DOLS, FMOLS, CCR	Nüfus artışı, milli gelir büyümesi ve yenilenemeyen enerji tüketiminin CO ₂ emisyonlarını artırdığı, doğal kaynakların tükenmesi, sanayi üretimi ve göçmen gönderilerinin CO ₂ emisyonları üzerinde anlamlı etkisinin olmadığı; Hindistan'da Çevresel Kuznets Eğrisi (ÇKE) hipotezinin geçerli olmadığı belirlenmiştir.
Karakurt ve Aydın (2023)	BRICS ve MINT ülkeleri	1980-2020	Fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan CO ₂ emisyonlarını tahmin etmektir.	Regresyon Modelleri, Determinasyon Katsayısı, F ve t Testleri	Geliştirilen modellerde yüksek doğruluk sağlandığı, BRICS ve MINT ülkelerinin gelecekte küresel ekonomi üzerinde belirleyici roller üstleneceği ve bu ülkelerde FFCO ₂ emisyonlarında ciddi artışların beklendiği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 3.1. (devam) Literatür Taraması Özet Tablosu

Yazar	Ülke-Bölge	Dönem	Amaç	Yöntem	Sonuç
Kartal (2023)	ABD	1973-2022	Enerji üretim kaynaklarının CO ₂ emisyonları üzerindeki etkilerini analiz etmektedir.	Dinamik Otoregresif Dağıtılmış Gecikmeli Model (DYNARDL), KRLS (Çekirdek Tabanlı Düzenleştirilmiş En Küçük Kareler), Eşbütünleşme Testleri	Fosil ve nükleer enerji üretiminin hem kısa hem uzun vadede CO ₂ emisyonlarını artırdığı, yenilenebilir enerji üretiminin ise kısa vadede emisyonları artırıp uzun vadede azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, enerji üretimindeki şokların emisyonları olumlu veya olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.
Kong vd. (2023)	Shandong, Çin	1998-2019 (veri seti) ve 2020-2050 (tahmin dönem)	Karbon nötrlüğü hedeflerine ulaşmak için karbon emisyonlarını etkileyen faktörleri analiz etmek ve Genişletilmiş STIRPAT modeli kapsamında değerlendirmek.	Logaritmik Ortalama Divisia Endeksi (LMDI) Yöntemi, Adaboost Algoritması, Senaryo Analizi	Ekonomik büyümenin karbon emisyonlarını en çok etkileyen faktör olduğu, ardından enerji yapısı ve enerji tüketiminin geldiği tespit edilmiştir. Shandong Eyaleti'nin karbon emisyonlarının 2030-2035 yılları arasında zirveye ulaşabileceği öngörülmektedir.
Lin vd. (2023)	Çin	2007-2020	Ekonomik büyüme ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki dengeyi sağlamada yeşil finansmanın rolünü araştırmaktır.	Logaritmik Ortalama Divisia Endeksi (LMDI), İki Aşamalı Ayrıştırma Analizi, Mekânsal Analiz Yöntemleri	Yeşil finansmanın karbon emisyonlarını azaltmada etkili olduğu, bu etkinin enerji yapısının dönüşümü, enerji verimliliğinin artırılması ve sanayi yapısının iyileştirilmesiyle gerçekleştiği tespit edilmiştir. Karbon emisyonlarını etkileyen faktörlerde mekânsal farklılıklar ve doğrusal olmayan ilişkiler de gözlemlenmiştir.
Pata vd. (2023)	ASEAN ülkeleri	1995-2018	Yenilenebilir enerji, turizm, gelir ve doğrudan yabancı yatırımların karbon emisyonları üzerindeki eşzamanlı etkilerini incelemektir.	Panel ARDL ve Dumitrescu-Hurlin Testi	Turizm ve doğrudan yabancı yatırımların CO ₂ emisyonlarını artırdığı, gelir artışı ve dışa açıklığın çevresel bozulmayı azalttığı, yenilenebilir enerjinin sadece kısa vadede emisyonları azaltıcı etkisi olduğu tespit edilmiştir. ÇKE hipotezinin geçerli olduğu belirlenmiştir.
Wei vd. (2023)	Henan, Çin	2000-2020	Tarım ve hayvancılık sektörlerinin ekonomik gelişimi ile karbon emisyonları arasındaki ilişkiyi Tapio Ayrıştırma Modeli ile Genişletilmiş STIRPAT Modeli kapsamında incelemektir.	Panel Veri Analizi	Tarım ve hayvancılık gelişimi ile karbon emisyonları arasındaki ilişkinin genellikle güçlü ve zayıf ayrışma (decoupling) şeklinde olduğu, karbon emisyon yoğunluğu ve işgücü etkisinin bu ilişkiyi optimize ettiği, kentleşme ve kırsal tüketimin ise emisyonları azalttığı tespit edilmiştir.
Voumik vd. (2023)	G-7 ülkeleri	1971-2019	Elektrik ve ısı üretiminden kaynaklanan CO ₂ emisyonlarının farklı enerji kaynakları üzerindeki etkisini araştırmaktır.	Kuantil Regresyon (QR), Genelleştirilmiş Momentler Yöntemi (GMM)	Kömür ve gazlı enerji santrallerinin çevre üzerinde büyük bir negatif etki yarattığı, kömür santrallerinin diğer enerji kaynaklarına göre daha fazla çevresel etkiyi barındırdığı belirlenmiştir. Hidroelektrik ve yenilenebilir enerji üretiminin CO ₂ emisyonlarını azalttığı, nükleer enerjinin çevre üzerinde faydalı etkisi olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3.1. (devam) Literatür Taraması Özet Tablosu

Yazar	Ülke-Bölge	Dönem	Amaç	Yöntem	Sonuç
Zeng ve Wang (2023)	Zhejiang, Çin	1990-2020	Ölçek ekonomileri, dış ticaret serbestisi, uluslararası yatırımlar, sanayi yapısı ve teknolojik gelişmenin karbon emisyonları üzerindeki etkilerini incelemektir.	Doğrusal Regresyon, ARDL Sınır Testi, VAR Analizi, Varyans Ayırıştırması	Kısa dönemde dış ticaretin karbon emisyonlarını artırdığı, sermaye-işgücü oranının etkisinin anlamlı olmadığı ve karbon emisyonlarının gecikmeli ve negatif etkisinin olduğu; uzun dönemde ise tüm değişkenlerle karbon emisyonları arasında güçlü ve anlamlı ilişkiler bulunduğu tespit edilmiştir.
Ahmed vd. (2022)	Çin ve Hindistan	1990-2014	Enerji tüketimi, finansal gelişme, GSYİH, nüfus ve yenilenebilir enerji kullanımının CO ₂ emisyonları üzerindeki etkisini incelemektir.	Makine Öğrenmesi Tabanlı Uzun Kısa Dönem Bellek (LSTM) Yöntemi	Enerji tüketimi CO ₂ emisyonlarını en fazla artıran faktör olurken, yenilenebilir enerji kullanımı en düşük etkiye sahiptir. Yenilenebilir enerji katsayısı artırılıp enerji tüketimi katsayısı azaltıldığında CO ₂ emisyonlarında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir.
Chen vd. (2022)	97 ülke	1995-2015	Yenilenemez ve yenilenebilir enerji tüketimi ile ekonomik büyümenin kişi başı CO ₂ emisyonlarına doğrusal olmayan etkilerini incelemektir.	Dinamik Panel Eşik Modeli	Yenilenebilir enerji tüketimindeki artışın yalnızca belirli bir eşğin aşılması durumunda kişi başı CO ₂ emisyonlarını azalttığı, bu bulgunun özellikle gelişmiş ülkeler ve güçlü kurumlara sahip ülkeler için geçerli olduğu tespit edilmiştir.
Dong vd. (2022)	32 Gelişmiş Ülke	2000-2018	Yenilenebilir enerji tüketimi ve karbon emisyon verimliliği arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi incelemektir.	SE-SBM (Süper Verimlilik Slack Tabanlı Ölçüm), PTIFEs (Etkileşimli Sabit Etkilerle Geliştirilmiş Panel Eşik Modeli)	Yenilenebilir enerji tüketimi emisyon verimliliğini artırırken, enerji tüketim yoğunluğu arttıkça bu etkinin azaldığı ve finansal gelişme ile iyileştiği belirlenmiştir. İlişkinin gelir seviyelerine göre farklılık gösterdiği de tespit edilmiştir.
Kırıkkaleli vd. (2022)	Şili	1990-2017	Finansal gelişme ve yenilenebilir enerji tüketiminin tüketim temelli CO ₂ emisyonlarına etkisini analiz etmektir.	ARDL, FMOLS, DOLS, Fourier Toda-Yamamoto Nedensellik Testi	Finansal gelişme ve yenilenebilir enerji tüketiminin CO ₂ emisyonlarını azalttığı, buna karşılık ekonomik büyüme ve elektrik tüketiminin emisyonları artırdığı tespit edilmiştir.
Lei vd. (2022)	Çin	1991-2019	Enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji tüketiminin CO ₂ emisyonları üzerindeki dinamik etkilerini incelemektir.	ARDL	Enerji verimliliğindeki negatif şokların uzun vadede CO ₂ emisyonlarını artırdığı, yenilenebilir enerji tüketimindeki pozitif şokların ise CO ₂ emisyonlarını azalttığı; kısa vadede ise enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji tüketimindeki pozitif şokların CO ₂ emisyonları üzerinde olumsuz etkilerinin olduğu belirlenmiştir.
Mentel vd. (2022)	Sahra Altı Afrika (44 ülke)	2000-2015	Sanayileşme ile karbon emisyonları arasındaki ilişkide yenilenebilir enerjinin aracı rolünü incelemektir.	İki Aşamalı Sistem Genelleştirilmiş Momentler Yöntemi (Two-Step System GMM)	Sanayi payının karbon emisyonlarını artırdığı, yenilenebilir elektrik üretiminin emisyonları azalttığı, yenilenebilir enerji üretimindeki %1'lik artışın karbon emisyonlarını %0,22 oranında düşürdüğü ve ÇKE hipotezinin doğrulandığı tespit edilmiştir.
Rahaman vd. (2022)	Bangladeş	1990-2019	DYY, turizm, elektrik tüketimi ve ekonomik kalkınmanın CO ₂ emisyonları üzerindeki etkilerini analiz etmektir.	Johansen Eşbütünleşme, Granger Nedensellik ve ARDL Sınır Testi	DYY, ekonomik kalkınma ve elektrik tüketiminin ve CO ₂ emisyonlarını artırdığı, turizmin ise emisyonları azalttığı belirlenmiştir. ÇKE hipotezinin Bangladeş için geçerli olduğu doğrulanmış, kısa dönemde yalnızca DYY'nin negatif etkisi anlamlı bulunmuştur.

Tablo 3.1. (devam) Literatür Taraması Özet Tablosu

Yazar	Ülke-Bölge	Dönem	Amaç	Yöntem	Sonuç
Xu vd. (2022)	Çin	2010-2020	Lojistik sektörüne bağlı karbon emisyonlarını analiz etmektir.	Logaritmik Ortalama Divisia Endeksi (LMDI), Çözülme Analizi	Çin'in Doğu bölgelerinde karbon emisyonlarının en yüksek seviyeye ulaştığı, ekonomik gelişmişliğin emisyonları artırdığı, lojistik gelişimin başlangıçta emisyonları artırdığı ancak zamanla etkinin azaldığı, enerji yoğunluğunun bölgeler arasında değişken olduğu belirlenmiştir.
Tutak ve Brodny (2022)	Avrupa Birliği Ülkeleri	2000-2019	Yenilenebilir enerji kullanımının, ekonomik göstergeler, sera gazı emisyonları ve geleneksel enerji tüketimi üzerindeki etkilerini araştırmaktır.	Kohonen Yapay Sinir Ağları	Yenilenebilir enerji tüketiminin ekonomik büyüme, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve geleneksel enerji tüketiminin düşürülmesi üzerinde olumlu etkisi olduğu; eski ve yeni AB ülkeleri arasında yenilenebilir enerji kullanımında belirgin farklar olduğu tespit edilmiştir.
Yu vd. (2022)	Gelişmekte Olan Ülkeler	2001-2019	Enerji yoksulluğu, yenilenebilir enerji tüketimi, kişi başı gelir, doğal gaz kullanımı ve ticaret serbestisinin CO ₂ emisyonları üzerindeki etkilerini incelemektir.	Panel Kantil Regresyon	Enerji yoksulluğunun azaltılmasının SDG7'ye ulaşmak ve karbon emisyonlarını düşürmek için öncelikli olduğu; yenilenebilir enerji kullanımı, ekonomik büyüme ve ticaret serbestisinin çevresel sürdürülebilirlik için önemli araçlar olduğu tespit edilmiştir.
Acheampong vd. (2021)	Sahra Altı Afrika (45 ülke)	1960-2017	Kurumsal kalite, yenilenebilir enerji kullanımı, karbon emisyonları ve ekonomik büyüme arasındaki zamansal nedensellik ilişkilerini incelemektir.	GMM-PVAR (Genelleştirilmiş Momentler Yöntemi - Panel Vektör Otoregresyon)	Ekonomik büyüme ile yenilenebilir enerji kullanımı arasında çift yönlü nedensellik olduğu, ekonomik büyümenin karbon emisyonlarını artırdığı, kurumsal kalite ve istekliliğin ise karbon emisyonlarına ve yenilenebilir enerji kullanımına tepki verdiği belirlenmiştir.
Bakay ve Ağbulut (2021)	Türkiye	1990-2018	Elektrik üretim sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarını tahmin etmektir.	Derin Öğrenme (DL), Destek Vektör Makineleri (SVM), Yapay Sinir Ağları (ANN)	Tüm algoritmaların yüksek doğruluk sağladığı, özellikle derin öğrenme algoritmasının %99,8 R ² değeri ile en başarılı sonucu verdiği belirlenmiştir.
Çıtak vd. (2021)	ABD	1997-2017	Yenilenebilir enerji ve doğalgaz tüketiminin CO ₂ emisyonları üzerindeki asimetrik etkisini incelemektir.	NARDL (Non-linear ARDL)	Yenilenebilir enerji ve doğalgaz tüketiminin CO ₂ emisyonları ile uzun vadede anlamlı bir ilişkiye sahip olduğu, ancak eyaletler arası farklılıklar gösterdiği tespit edilmiştir.
Hacımamoğlu ve Sandalcılar (2021)	RECAI Kapsamındaki 35 Ülke	1990-2016	Yenilenebilir ve yenilenemez enerji tüketimi ile ekonomik istikrar arasındaki nedensellik ilişkisini incelemektir.	Panel Nedensellik Testleri	Gelişmiş ülkelerde yenilenebilir enerjiden ekonomik istikrara ve ekonomik istikrardan yenilenemez enerjiye doğru tek yönlü nedensellik bulunmuş; bu ülkelerde "büyüme" ve "koruma" hipotezleri geçerli bulunmuştur. Gelişmekte olan ülkelerde ise anlamlı bir ilişki saptanamamış ve "yansızlık" hipotezi geçerli bulunmuştur.

Tablo 3.1. (devam) Literatür Taraması Özet Tablosu

Yazar	Ülke-Bölge	Dönem	Amaç	Yöntem	Sonuç
Karimi vd. (2021)	İran	1975-2017	Ekonomik büyüme, yenilenebilir enerji tüketimi ve karbon emisyonları arasındaki ilişkileri incelemektir.	Eşbütünleşme Sınır Testi, NARDL	Yenilenebilir enerji tüketimi ve karbon emisyonlarındaki artışın kişi başı GSYİH'ı uzun vadede artırdığı; kısa vadede bu değişimlerin büyüme üzerinde belirgin olumsuz etkisinin olmadığı belirlenmiştir. İran'ın yenilenebilir enerji kaynaklarının sınırlılığı bu sonuçlarla ilişkilendirilmiştir.
Kwakwa (2021)	Gana	1971-2014	Gelir artışı, elektrik tüketimi ve elektrik krizlerinin CO ₂ emisyonları üzerindeki etkilerini analiz etmektir.	ARDL Sınır Testi ve FMOLS	ÇKE hipotezinin Gana için geçerli olduğu belirlenmiştir. Elektrik tüketiminin emisyonlar üzerinde anlamlı etkisi bulunmazken, elektrik krizlerinin emisyonları artırdığı; sanayileşme ve finansal gelişmişliğin emisyon artışına katkı sağladığı tespit edilmiştir.
Li ve Haneklaus (2021)	Çin	1990-2020	Ekonomik büyüme, yenilenebilir enerji, fosil yakıt tüketimi, kentleşme ve CO ₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi incelemektir.	ARDL, ÇKE Hipotezi	Kişi başına GSYİH ile CO ₂ emisyonları arasında ters U şeklinde bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Fosil yakıt tüketimindeki %1'lik artışın CO ₂ emisyonlarını %0,235 artırdığı, yenilenebilir enerji tüketimindeki %1'lik artışın ise uzun vadede %0,259 azalttığı tespit edilmiştir. Ancak kısa vadede yenilenebilir enerji tüketimindeki %1'lik artışın CO ₂ emisyonlarını %0,285 - %0,288 oranında artırdığı bulunmuştur.
Magazzino vd. (2021)	Çin, Hindistan, ABD	ABD: 1983-2017, Hindistan: 1986-2017, Çin: 1990-2017	Güneş ve rüzgâr enerjisi üretimi, kömür tüketimi, GSYİH ve CO ₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi incelemektir.	Makine Öğrenmesi (D2C (Causal Direction from Dependency))	Hindistan'da CO ₂ emisyonlarında azalma yerine artış gözlemlenirken, Çin ve ABD'nin sürdürülebilirlik açısından Hindistan'dan daha umut verici olduğu belirlenmiştir.
Ren vd. (2021)	Çin	2000-2015	Çelik sektöründeki karbon emisyonlarını etkileyen temel faktörleri STIRPAT Modeli kapsamında incelemektir.	Üç Aşamalı En Küçük Kareler (3SLS)	Ekonomik büyüme, DYY ve karbon emisyonları arasında ülke genelinde ve Batı bölgesinde çift yönlü nedensellik ilişkisi bulunmuş; Orta bölgede karbon emisyonları ile DYY arasında çift yönlü ilişki varken, Doğu bölgede bu ilişkinin olmadığı tespit edilmiştir.
Türkoğlu (2021)	Çin	1971-2019	Ekonomik büyüme, karbondioksit emisyonu ve enerji tüketimi arasındaki nedensellik ilişkisini araştırmaktır.	Eşbütünleşme Testi, Granger Nedensellik Testi, Etki-Tepki Analizi	CO ₂ emisyonunun hem ekonomik büyüme hem de enerji tüketimi ile uzun vadede anlamlı bir ilişki içinde olduğu; kısa vadede ise ekonomik büyümeden enerji tüketimi ve CO ₂ emisyonuna doğru, enerji tüketiminden CO ₂ emisyonuna doğru tek yönlü nedensellik bulunduğu tespit edilmiştir.
Wang vd. (2021)	Düşük ve Orta Gelirli 64 Ülke	2005-2014	Yenilenebilir enerji kullanımı ve çevresel sürdürülebilirlik notlarının ÇKE ve Kirlilik Cenneti Hipotezi üzerindeki etkilerini analiz etmektir.	Panel Veri Analizi	Kişi başı GSYİH ile CO ₂ emisyonları arasında ters S ilişkisi, yenilenebilir enerji kullanımı ile CO ₂ emisyonları arasında orta gelirli ülkelerde ters N, düşük gelirli ülkelerde V şeklinde ilişki bulunmuştur. Yabancı yatırımların CO ₂ emisyonları üzerindeki etkisi orta gelirli ülkelerde N eğrisi, düşük gelirli ülkelerde pozitif yönlüdür.
Kırman ve Kesbiç (2020)	Seçili 11 Ülke	1980-2014	Kişi başına gelir ve CO ₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi incelemektir.	CADF Birim Kök Testi, GUW Panel Eşbütünleşme Testi, DOLSMG	Gelir ve çevresel kirlilik arasında ters N şeklinde bir ilişki bulunmuştur.

Tablo 3.1. (devam) Literatür Taraması Özet Tablosu

Yazar	Ülke-Bölge	Dönem	Amaç	Yöntem	Sonuç
Musah vd. (2020)	Batı Afrika ülkeleri	1990-2018	Yenilenebilir enerji tüketimi ve CO ₂ emisyonları arasındaki ilişkisi araştırmaktır.	Panel Veri Analizi	Yenilenebilir enerji ve CO ₂ emisyonları arasında geri bildirim nedensel ilişki tespit edilmiştir.
Appiah vd. (2018)	Seçili Yükselen Ekonomiler	1971-2013	CO ₂ emisyon tahmini yapmaktır.	İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı (FFNN), Levenberg-Marquardt (LM) Algoritması	Geliştirilen yapay sinir ağı modelinin gelecekteki CO ₂ emisyonlarını yüksek doğrulukla tahmin edebildiği sonucuna ulaşılmıştır.
Benli ve Peker (2018)	Türkiye	1960-2013	Elektrik tüketimi, CO ₂ emisyonu ve kişi başına GSYİH arasındaki ilişkiyi incelemektir.	Eşbütünleşme Analizi ve Granger Nedensellik Testi	Enerji tüketimi ve CO ₂ emisyonu arasında eşbütünleşme ilişkisi bulunmuş, ancak CO ₂ emisyonu ve elektrik tüketimi ile kişi başı GSYİH arasında bulunamamıştır. Granger nedensellik testi hem CO ₂ emisyonunun hem de elektrik tüketiminin GSYİH'nin nedeni olduğunu göstermiştir.
İnglesi-Lotz ve Dogan (2018)	Sahra Altı Afrika (10 ülke)	1980-2011	CO ₂ emisyonlarının belirleyicilerini incelemektir.	Panel Tahmin Yöntemleri	Yenilenemez enerji tüketiminin CO ₂ emisyonlarını artırdığı, yenilenebilir enerji tüketiminin azaltıcı etkisi olduğu belirlenmiştir. CO ₂ emisyonları, gelir, ticaret ve yenilenemez enerji tüketiminin yenilenebilir enerji tüketimini etkilediği saptanmıştır.
Liu ve Bae (2018)	Çin	1970-2015	Yenilenebilir enerjinin CO ₂ salımı üzerindeki etkisini incelemektir.	ARDL, Johansen-Juselius Eşbütünleşme Testi, VECM	Kısa dönemde yenilenebilir enerji payı arttıkça CO ₂ salımı azalmakta, ancak uzun dönemde yenilenebilir enerjinin CO ₂ salımı üzerinde bir etkisi bulunmamaktadır.
Pata ve Yurtkuran (2018)	Türkiye	1981-2014	Yenilenebilir enerji tüketimi, nüfus yoğunluğu, gelir, finansal gelişme ve CO ₂ emisyonu ilişkilerini Çevresel Kuznets Hipotezi kapsamında incelemektir.	ARDL Sınır Testi	Finansal gelişme, nüfus yoğunluğu ve ekonomik büyümenin CO ₂ emisyonunu artırdığı, yenilenebilir enerji kullanımının çevresel sürdürülebilirlik üzerinde olumlu etkisi olduğu bulunmuştur.
Sancar ve Polat (2018)	G7 ülkeleri	1980-2011	CO ₂ emisyonu, ekonomik büyüme ve enerji tüketimi arasındaki ilişkileri incelemektir.	Panel Veri Analizi	CO ₂ emisyonu ile GSYİH ve enerji tüketimi ile GSYİH arasında çift yönlü nedensellik ilişkisi bulunmuştur.
Şimşek ve Yiğit (2017)	BRİCT ülkeleri	1990-2015	Karbon emisyonları, yenilenebilir enerji tüketimi, kentleşme, kişi başına GSYİH ve petrol fiyatları arasındaki ilişkiyi incelemektir.	Panel VAR, Dumitrescu-Hurlin Nedensellik Testi	GSYİH ile kentleşme, petrol fiyatları, yenilenebilir enerji ve karbon emisyonları arasında tek yönlü nedensellik ilişkisi belirlenmiştir.
Begüm vd. (2015)	Malezya	1970-2009	GSYİH büyümesi, nüfus artışı ve enerji tüketiminin CO ₂ emisyonları üzerindeki dinamik etkilerini incelemektir.	Dinamik En Küçük Kareler (DOLS), SLM U Testi, ÇKE Hipotezi	1980-2009 döneminde GSYİH arttıkça emisyonların keskin şekilde arttığı bulunmuş, ÇKE hipotezinin Malezya için geçerli olmadığı belirlenmiştir. Kişi başı enerji tüketimi ve GSYİH'nin uzun vadede CO ₂ emisyonları üzerinde pozitif etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 3.1. (devam) Literatür Taraması Özet Tablosu

Yazar	Ülke-Bölge	Dönem	Amaç	Yöntem	Sonuç
Shahbaz vd. (2015)	Malezya	1970 - 2011	Kentleşmenin enerji tüketimi üzerindeki etkisini STIRPAT Modeli kapsamında incelemektir.	Birim Kök ve ARDL Sınır Testi	Kentleşmenin enerji tüketimini artırdığı, refah ve sermaye stokunun enerji talebini yükselttiği, ticari açıklığın dolaylı olarak enerji tüketimini artırdığı bulunmuştur. Enerji tüketimi ile refah ve sermaye arasında çift yönlü ilişki belirlenmiştir.
Wang ve Zhao (2015)	Çin (30 Eyalet)	1997-2012	Enerjiye bağlı CO ₂ emisyonlarını etkileyen faktörleri STIRPAT Modeli kapsamında incelemektir.	Kümelendirme Analizi (K-Means), Çoklu Bağlıntısal Testi (VIF) ve Kısmi En Küçük Kareler Regresyonu	Enerji yoğunluğunun etkisi yüksek gelişmişlik düzeyindeki bölgelerde fazladır. Kentleşme, sanayi yapısı ve dış ticaretin etkisi düşük gelişmişlik düzeyindeki bölgelerde daha belirgin bulunmuştur. Gelişmekte olan bölgelerde nüfus ve GSYİH karbon emisyonlarını daha fazla etkilemektedir.
Wu vd. (2015)	BRICS Ülkeleri	2004-2010	Enerji tüketimi, ekonomik büyüme, kentsel nüfus ve CO ₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi incelemektir.	Çok Değişkenli Gri Model	Ekonomik büyüme Brezilya ve Rusya'da CO ₂ emisyonlarını azaltırken, Hindistan, Çin ve Güney Afrika'da artırmaktadır. Kentsel nüfus ve enerji tüketimi arttıkça tüm BRICS ülkelerinde CO ₂ emisyonları artmaktadır. Çin'de CO ₂ artış hızı en yüksek, Rusya ve Güney Afrika'da en düşüktür.
Bölük ve Mert (2014)	16 AB üyesi ülke	1990-2008	Karbon emisyonları, gelir ve enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi ÇKE hipotezi çerçevesinde incelemektir.	Panel Veri Analizi	ÇKE hipotezi 16 AB ülkesinde geçerli olmamıştır. Yenilenebilir enerji tüketiminin, fosil enerjiye göre GHG emisyonlarına daha az katkı sağladığı bulunmuştur.
Cowan vd. (2014)	BRICS ülkeleri	1990-2010	Elektrik tüketimi, ekonomik büyüme ve CO ₂ emisyonları arasındaki nedensellik ilişkisini incelemektir.	Panel Nedensellik Testi	Elektrik ve GSYİH arasındaki ilişki: Rusya'da geri besleme, Güney Afrika'da koruma, Brezilya, Hindistan ve Çin'de nötrallite. CO ₂ ve GSYİH arasında: Rusya'da geri besleme, Güney Afrika'da tek yönlü nedensellik, Brezilya'da ters ilişki bulunmuş, Hindistan ve Çin'de nedensellik tespit edilmemiştir.
Shafiei ve Salim (2014)	OECD ülkeleri	1980-2011	CO ₂ emisyonlarının belirleyicilerini STIRPAT Modeli ile incelemek.	Birim Kök, Panel Eşbütünlük ve Granger Nedensellik Testleri	Yenilenemez enerji tüketimi CO ₂ emisyonlarını artırırken, yenilenebilir enerji tüketimi azaltmaktadır. Kentleşme ile CO ₂ emisyonları arasında ÇKE hipotezinin varlığı desteklenmiştir. Yüksek kentleşme seviyelerinde çevresel etkinin azaldığı bulunmuştur.
Lean ve Smyth (2010)	ASEAN ülkeleri	1980-2006	CO ₂ emisyonları, elektrik tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi incelemektir.	Panel Vektör Hata Düzeltme Modeli (PVECM), Granger Nedensellik Testleri	Uzun dönemde elektrik tüketimi ile emisyonlar arasında pozitif bir ilişki ve emisyonlar ile reel çıktı arasında ÇKE'ye uygun doğrusal olmayan bir ilişki bulunmaktadır. Uzun vadede elektrik tüketimi ve emisyonlardan büyümeye tek yönlü, kısa vadede emisyonlardan elektrik tüketimine tek yönlü nedensellik bulunmuştur.

Tablo 3.1'e göre son yıllarda farklı ülkeler ve ülke kümeleri için çeşitli modelleme ve analiz yöntemleri kullanılarak, CO₂ emisyonlarına etki eden faktörlerin araştırıldığı görülmektedir. Araştırmalarda karbon emisyonlarına etki eden faktörleri belirlemek için ise kısıtlı sayıda değişkenin kullanıldığı, RECAI kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların ise yeterli sayıda olmadığı ve genellikle çalışmaların zaman serileri ile panel veri analiz yöntemlerine odaklanan çalışmalardan ibaret olduğu, makine öğrenmesi gibi algoritmaların uygulandığı çalışmaların az sayıda gerçekleştirildiği görülmüştür. RECAI'e (2015) göre, endeks makroekonomik göstergeler, enerji piyasası özellikleri ve teknolojik unsurlar gibi bir ülkenin yenilenebilir enerji potansiyelini doğrudan etkileyen temel faktörleri dikkate alarak ülkeleri hem yatırım açısından cazip hem de enerji geçiş sürecinde öncü olma potansiyeline sahip olmalarına göre belirlediği için CO₂ emisyonlarına etki eden faktörlerin belirlendiği bir çalışma için oldukça önemli bir örnekleme temsil etmektedir. CO₂ emisyonlarına etki eden unsurların incelendiği bu çalışma için, RECAI kapsamında yer alan 32 ülke, altı adet bağımsız değişken ile makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Böylece literatüre özgün ve yön gösterici bir çalışma ile katkı sağlanacaktır.

4. KARBON EMİSYONLARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN RECAI ÜLKELERİNDE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE ANALİZİ

Bu bölümde araştırmanın önemi ve amacı, kapsam ve sınırlılıkları, veri seti ve analizi, yöntem ve modeli ile analiz bulgularına yönelik bilgiler sunulmuştur.

4.1. Araştırmanın Önemi ve Amacı

Hızla değişen ve gelişen dünyada yaşanan nüfus ve tüketim miktarlarındaki artış, buna bağlı olarak doğal kaynaklardaki azalış ve çevresel tahribat sonucu küresel iklim değişiklikleri meydana gelmiştir. Tüm canlılar için risk oluşturan bu iklim değişikliğinin en büyük sebeplerinden biri ise doğaya salınan sera gazı emisyonlarıdır.

Sera etkisine neden olan gazlar içerisindeki en büyük payı CO₂ gazı almakta ve CO₂ özellikle enerji üretimi için fosil enerji kullanımı ya da biokütle yakıt olarak kullanılmasıyla ortaya çıkmaktadır (Dam, 2014: 10; Dulkadiroğlu, 2017: 67). Sera etkisinin olumsuz etkilerinden kurtulmak için özellikle CO₂ emisyonu salınımının azaltılmasına yönelik çalışmalar hükümetler açısından oldukça önem kazanmıştır. Fosil ve biyokütle gibi çevreye zarar veren enerji kaynakları dışında yenilenebilir enerji kaynakları üretimi ve tüketimi için çalışmalar hızla artış göstermiştir. Literatür incelendiğinde son yıllarda farklı ülkeler için çeşitli modelleme ve analiz yöntemleri kullanılarak CO₂ emisyonlarına etki eden faktörlerin araştırıldığı, karbon emisyonlarına etki eden faktörleri belirlemek için kısıtlı sayıda değişkenlerin kullanıldığı, Yenilenebilir Enerji Ülke Çekiciliği Endeksi (RECAI) kapsamındaki ülkeler düzeyinde yapılan incelemelerin ise yeterli sayıda olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca çalışmaların genellikle zaman serileri ve panel veri analizi gibi yöntemlere odaklanan çalışmalardan ibaret olduğu, makine öğrenmesi gibi algoritmaların uygulandığı az sayıda çalışmanın (Raghutla ve Kolati, 2023; Hasanov, vd., 2024) gerçekleştirildiği görülmüştür. RECAI'e (2015) göre, endeks yenilenebilir enerji yatırımları ve dağıtım fırsatları açısından dünya genelindeki en çekici 40 ülkeyi belirleyen bir endekstir. Endeks; makroekonomik göstergeler, enerji piyasası özellikleri ve teknolojik unsurlar gibi bir ülkenin yenilenebilir enerji potansiyelini doğrudan etkileyen temel faktörleri dikkate alarak ülkeleri hem yatırım açısından cazip hem de enerji geçiş sürecinde öncü olma potansiyeline sahip olmalarına göre belirlemektedir. Endeks enerji piyasası özellikleri, makroekonomik göstergeler ve teknolojik unsurlar gibi karbon emisyonlarını doğrudan etkileyen unsurları barındıran

lkeleri kapsadığı için, bu konuda yapılacak araştırmalar açısından ideal bir örneklem sağlamaktadır. Bu açıdan çalışmada, RECAI kapsamında yer alan ülkeler örneklem olarak seçilmiştir.

Bu ereve de çalışmanın amacı; Yenilenebilir Enerji lke ekiciliği Endeksi (RECAI) kapsamında yer alan ülkelerdeki CO₂ emisyon miktarına etki eden değişkenlerin makine öğrenmesi yöntemleri ile incelenmesidir.

Çalışmada ilk olarak RECAI lkeleri CO₂ emisyon seviyelerine göre makine öğrenmesi yöntemlerinden X-Means algoritması kullanılarak kümelere ayrılmıştır. Böylece, benzer kişi başına CO₂ emisyon seviyelerine sahip olan ülke grupları oluşturulmuştur. Ardından, her bir ülkede kişi başına CO₂ emisyon seviyelerine etki eden değişkenlerin ağırlık katsayıları, Destek Vektör Regresyonu (DVR)’nın WEKA 3.9.6 programı uyarlaması olan SMOreg (Sıralı Minimal Optimizasyona Dayalı Regresyon) algoritması ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, her ülke için kişi başına CO₂ emisyonuna en fazla ve en az etki eden değişkenler belirlenmiştir. Son aşamada ise ülke bazlı analizlerden elde edilen bulgular doğrultusunda, kümeler genelinde kişi başına CO₂ emisyon miktarına etki eden değişkenler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece alışma, ülkelerde kişi başına CO₂ emisyonuna etki eden unsurların incelenmesini sağlamasının yanında ülke kümeleri bazında da değerlendirmelerin yapılmasına fırsat vermektedir ve bu açıdan çalışma literatüre özgün ve önemli bir katkı sağlayacaktır.

4.2. Araştırmanın Kapsam ve Sınırlılıkları

Yenilenebilir Enerji lke ekiciliği Endeksi (RECAI-Renewable Energy Country Attractiveness Index), Ernst ve Young tarafından geliştirilmiş bir yöntem olup, ülkelerin yenilenebilir enerji yatırımları ve dağıtım fırsatları açısından çekiciliğini değerlendirmek amacıyla tasarlanmıştır. Endeks, enerji sektöründe lider konumda olan ilk 40 ülkeyi belirlemek için kullanılmaktadır. Değerlendirme sürecinde makroekonomik göstergeler, enerji piyasası özellikleri ve teknolojik unsurlar temel belirleyiciler olarak ön plana çıkmaktadır. Makroekonomik göstergeler, genel ekonomik istikrar ve yatırım ortamını içerirken; enerji piyasası, sektördeki öncelikler ve yenilenebilir enerji finansmanı ile ilgili unsurları kapsamaktadır. Teknolojik unsurlar ise projelerin cazibesini belirleyen önemli faktörlerden biridir. Bu bağlamda RECAI, yalnızca enerji sektörüne ilişkin faktörleri değil aynı zamanda

makroekonomik ve teknolojik unsurları da dikkate alarak yenilenebilir enerji açısından en çekici 40 ülkeyi sıralayan bir endekstir (RECAI, 2015: 35-37). Tablo 4.1’de 2021 yılı RECAI raporu kapsamında yer alan 40 ülke sunulmuştur.

Tablo 4.1. Yenilenebilir Enerji Ülke Çekiciliği Endeksi (RECAI) Kapsamında Yer Alan Ülkeler (2021)

1.ABD	11.Hollanda	21.Güney Kore	31.Finlandiya
2.Çin	12.Şili	22.Polonya	32.Norveç
3.Hindistan	13.İtalya	23.Portekiz	33.Meksika
4.Fransa	14.İrlanda	24.Yunanistan	34.Güney Afrika
5.Birleşik Krallık	15.Danimarka	25.Arjantin	35.İsviçre
6.Almanya	16.Fas	26.Belçika	36.Kazakistan
7.Avustralya	17.İsrail	27.Filipinler	37.Macaristan
8.Japonya	18.Kanada	28.Türkiye	38.Ürdün
9.Brezilya	19.Mısır	29.Vietnam	39.Endonezya
10.İspanya	20.İsveç	30.Tayvan	40.Kenya

Kaynak: Ernest & Young (2022).

Tablo 4.1’e göre, 2021 yılında RECAI raporu kapsamında 40 ülke yer almaktadır ve bu 40 ülke üzerinden çalışmanın yürütülmesi hedeflenmiştir. Ancak Filipinler, Kenya, Portekiz, Ürdün, Kazakistan, Polonya, Tayvan ve Vietnam’ın çalışmada kullanılan çeşitli veri setlerinde karşılaşılan eksikliklerden dolayı çalışma diğer 32 ülke ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca 1991-2023 dönemi verilerinin kullanılması çalışmanın diğer sınırlılığını oluşturmaktadır.

4.3. Araştırmanın Veri Seti ve Analizi

Araştırmada ikincil verilere dayalı olarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın veri seti 1991-2023 dönemini kapsamaktadır. Çalışmada kullanılan değişkenler Ahmed vd. (2022), Dong vd. (2022), Magazzino vd. (2021), Lei vd. (2022), Li ve Haneklaus (2021), Appiah vd. (2018), Benli ve Peker (2018), Inglesi-Lotz ve Dogan (2018), Wang ve Zhao (2015) ve Shahbaz vd. (2015) çalışmalarından yararlanılarak belirlenmiştir. Tablo 4.2’de çalışma kapsamında kullanılan değişkenler ve değişkenlere ait veri seti ve kaynakları sunulmuştur.

Tablo 4.2. Değişkenler, Veri seti ve Veri Kaynakları

Değişkenler	Açıklama	Veri Kaynağı
CO ₂ (Bağımlı Değişken)	CO ₂ emisyonu (Kişi başına, metrik ton)	Dünya Bankası
YET (Bağımsız Değişken)	Yenilenebilir enerji tüketimi (kişi başına- kilowatt-saat, kwh)	Our World in Data
FET (Bağımsız Değişken)	Fosil enerji tüketimi (kişi başına- kilowatt-saat, kwh)	Our World in Data
DT (Bağımsız Değişken)	Dış ticaret hacmi (GSYİH'nin yüzdesi cinsinden)	Dünya Bankası
DYY (Bağımsız Değişken)	Doğrudan yabancı yatırımlar (net girişler, GSYİH'nin yüzdesi cinsinden)	Dünya Bankası
GSYİH (Bağımsız Değişken)	Ekonomik büyüme (kişi başına GSYİH, 2015 yılı sabit fiyatlarıyla, milyon dolar)	Dünya Bankası
KENT (Bağımsız Değişken)	Kentleşme (Kentsel nüfusun toplam nüfusa oranı, %)	Dünya Bankası

Tablo 4.2'ye göre, çalışma kapsamında kullanılan değişkenler: CO₂ emisyonları (CO₂)-(kişi başına, metrik ton), yenilenebilir enerji tüketimi (YET)-(kişi başına, kilowatt-saat), fosil enerji tüketimi (FET)-(kişi başına, kilowatt-saat), dış ticaret (DT)-(GSYİH'nin yüzdesi), doğrudan yabancı yatırımlar (DYY)-(GSYİH'nin yüzdesi), ekonomik büyüme (GSYİH)-(kişi başına GSYİH-2015 yılı sabit fiyatlarıyla, milyon dolar) ve kentleşme (KENT)-(kentsel nüfusun toplam nüfusa yüzdesi) şeklindedir. Yenilenebilir ve fosil enerji tüketim verileri Our World in Data (t.y.), diğer değişkenlere ait veri setleri ise Dünya Bankası (t.y.) web sayfalarından elde edilmiştir.

Verilerin analizi ise WEKA 3.9.6 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.4. Araştırmanın Yöntem ve Modeli

Bu bölümde, araştırmada kullanılan yöntem ve model tanıtılmakta, veri analiz sürecinde izlenen adımlar açıklanmaktadır.

4.4.1. Araştırmanın Yöntemi

Bu çalışmada RECAI ülkelerinde CO₂ emisyonlarına etki eden faktörleri belirlemek için makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır. Makine öğrenmesi (Machine Learning-ML), ilk olarak Samuel'in çalışmasında (1959) dama oyunu

oynayabilen ve deneyimle kendini geliştirebilen bir bilgisayar programı aracılığıyla uygulanmıştır. Zaman içerisinde gelişim gösteren makine öğrenmesi metotları, temelde bilgisayarların verilerden öğrenerek kendi performanslarını geliştirmesini inceleyen bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Makine öğrenmesinin temel amacı, makinelerin karmaşık örüntüleri tanıyıp bu bilgilerle mantıklı kararlar almasını sağlamaktır. Buna göre ML, farklı öğrenme yaklaşımlarıyla veriler üzerinden bilgi üretme sürecidir. Genel anlamda dört temel makine öğrenmesi yöntemi öne çıkmaktadır. Bunlar sırasıyla (Han vd., 2011: 24-25): “*denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme, yarı-denetimli öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme*” şeklindedir. *Denetimli öğrenme*, geçmişte sonuçları bilinen verilerle modellerin eğitildiği bir yöntemdir. Denetimli öğrenme; sınıflandırma, sayısal değer tahmini ve öngörüselleştirme gibi alanlarda tercih edilmektedir. Bu yöntemde sıkça kullanılan algoritmalar arasında doğrusal ve lojistik regresyon, destek vektör makineleri, karar ağaçları, rastgele ormanlar, artırma yöntemleri ve yapay sinir ağları gibi çeşitli modeller yer almaktadır (Shameer vd., 2018: 1158-1159; Kadhim, 2019: 273-274; Verma vd., 2022: 402). *Denetimsiz öğrenme*, veri üzerinde herhangi bir etiket bilgisi olmaksızın, sistemin verideki gizli örüntüleri keşfetmesini sağlayarak çalıştığı bir öğrenme yöntemidir. Bu yaklaşımda benzer özellikler taşıyan verilerin gruplanması ya da verinin daha sade ve anlamlı biçimde temsil edilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca anomali tespiti gibi özel durumların belirlenmesine de olanak tanımaktadır. Kümeleme algoritmaları, temel bileşen analizi, birliktelik analizleri ve benzeri boyut indirgeme yöntemleri bu gruba örnek algoritmalar (Shameer vd., 2018: 1158-1159; Eckhardt vd., 2023: 380; Naeem vd., 2023: 912-913). *Yarı denetimli öğrenme*, az miktarda etiketli veri ile birlikte çok sayıda etiketsiz verinin bir arada kullanıldığı bir makine öğrenmesi yaklaşımıdır. Uygulamalarda sıkça karşılaşılan etiketsiz verinin bol fakat, etiketli verinin sınırlı olduğu durumlarda, iki veri türünü bir arada değerlendirerek modelin daha doğru ve güçlü öğrenmesini sağlayan yöntemdir (Mohammed vd., 2016; Van Engelen ve Hoos, 2020: 373). *Pekiştirmeli öğrenmede* ise bir yazılım ajanı, belli bir ortamda eylemler gerçekleştirmekte ve bu eylemlerin sonucunda ödül ya da ceza alarak zaman içinde en uygun davranış biçimini öğrenerek geliştirmektedir. Ajanın hedefi, uzun vadede en fazla ödülü kazanacak kararları almaktır (Shameer vd., 2018: 1158-1159; Shakya vd., 2023: 1).

Bu çalışmada iki adet makine öğrenmesi yöntemi kullanılmıştır. İlk aşamada, denetimsiz öğrenme yöntemlerinden kümeleme yöntemi kullanılarak ülkeler kişi başına CO₂ verilerine göre kümelere ayrılmıştır. İkinci aşamada ise ülkelerde kişi başına CO₂ emisyon seviyelerine etki eden değişkenlerin ağırlık katsayılarını belirlemek için denetimli öğrenme algoritmalarından Destek Vektör Regresyonu (DVR) kullanılmıştır. Bu doğrultuda WEKA programı yardımıyla gerçekleştirilen analizlerde, kümeleme için olarak X-Means algoritması; destek vektör regresyonu için ise SMOreg (Sıralı Minimal Optimizasyona Dayalı Regresyon) algoritması ile analizler gerçekleştirilmiştir.

Kümeleme Algoritması

2000 yılında Dan Pelleg ve Andrew Moore tarafından geliştirilen X-Means algoritması, geleneksel K-Means kümeleme yönteminin bazı yapısal zayıflıklarını ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiş bir kümeleme yöntemidir. X-Means algoritması; kümeleme çalışmaları için oldukça fazla tercih edilen bir yöntem olan K-Means algoritmasının, kullanıcılardan küme sayısı olan (k)'yı önceden belirlemesini istemesi açısından kısıtlayıcı yapısına bir çözüm olarak üretilmiştir. Küme sayısını önceden hesaplamaya gerek kalmadan kullanıcı tarafından belirlenen alt (Kmin) ve üst (Kmax) küme sayılarını dikkate alarak otomatik olarak belirleyebilmektedir (Pelleg ve Moore, 2000; Kumar ve Wasan, 2010: 833; Fadhilah vd., 2024: 49). X-Means, kümelenmeleri belirlerken Bayes Bilgi Kriteri (BIC) yardımıyla veri setindeki yapısal örüntüleri daha doğru biçimde ortaya koymayı amaçlayarak en uygun küme sayısını oluşturmaktadır. Bayes Bilgi Kriterinin formülasyonu eşitlik 4.1'de yer almaktadır (Pelleg ve Moore, 2000).

$$BIC(M_j) = l_j(D) - \frac{P_j}{2} \log R \quad (4.1)$$

$l_j(D)$: j'inci model (M_j) kapsamında, veri kümesinin maksimum olabilirlik noktasında elde edilen log-olasılık değerini,

P_j : Model M_j 'de yer alan serbest parametre sayısını,

D : İşlem gören veri kümesini,

R : Aday küme merkezleriyle ilişkilendirilen toplam veri noktası sayısını ifade etmektedir.

Buna göre, algoritma kullanıcı tarafından belirlenen üst sınır küme sayısını aşmadan en uygun küme sayısını Bayes Bilgi Kriteri (BIC) ile otomatik olarak belirleyerek, küme sayısının hesaplanmasına olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır (Monica vd., 2018). Böylece küme sayısını hesaplamak için diğer algoritmalar gibi başka analiz ve endekslere gerek duymadan küme sayısını kendisi hesaplamaktadır.

Witten vd.'ne (2011) göre, X-means algoritması uygulanırken, çeşitli mesafe metrikleri (Manhattan, Minkowski, Chebyshev, Öklidyen vd.) kullanılmaktadır. Öklidyen mesafe metriği farklı veri kümelerinde dengeli ve güvenilir sonuçlar sunması, değişkenlerin farklı ölçeklerde olması durumunda normalizasyon ile birlikte kullanıldığında doğruluk ve karşılaştırılabilirlik açısından uygunluğunun artmasını sağlamaktadır. Bu açıdan çalışmada veri noktaları arasındaki benzerlikleri ölçmek için Öklidyen mesafe metriğinin kullanılması tercih edilmiştir.

Öklidyen mesafe metriği, iki veri noktası arasındaki geometrik uzaklığı temel olarak ve yalnızca büyüklük farklarını dikkate alarak kümeleme işleminin gerçekleşmesini sağlamaktadır. İki vektör arasındaki Öklidyen mesafenin istatistiksel açılımı ise eşitlik 4.2'de yer almaktadır (Frades ve Matthiesen, 2009: 86-87; Ultsch ve Lötsch, 2022: 3-4):

$$d_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (4.2)$$

d_e : Öklidyen mesafesini,

X_i, Y_i : Karşılaştırılan iki noktanın i'inci boyuttaki değerlerini,

n : Boyut sayısını ifade etmektedir.

Son olarak kümeleme analizi için uygulanan X-means algoritmasının değişkenlerin ölçeklerinden doğrudan etkilenmemesi için ülkelerin kişi başı CO₂ emisyon düzeylerine ait veriler normalize edilerek kümeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece hem veri setindeki uç değerlerin etkisi azaltılmış hem de algoritmanın kümeleri daha sağlıklı biçimde belirlemesi sağlanmıştır. Mazziotta ve Pareto (2022) ve El Khattabi vd. (2024), normalizasyon işlemini, [0–1] aralığında dönüşüm sağlayan Min–Max yöntemi ile gerçekleştirildiğini ifade etmektedir ve yöntemin istatistiksel gösterimi eşitlik 4.3'te sunulmaktadır.

$$X_{min-max} = \frac{X - Min(x)}{Max(x) - Min(x)} \quad (4.3)$$

X : Normalizasyon uygulanacak ham veri değeri,

$Min(x)$: İlgili değişkenin veri setindeki en küçük değeri,

$Max(x)$: İlgili değişkenin veri setindeki en büyük değeri ifade etmektedir.

Destek Vektör Regresyonu (DVR)

Destek vektör makinesi (DVM), regresyon ve sınıflandırma problemlerinde kullanılan gelişmiş bir denetimli makine öğrenmesi yöntemidir (Cortes ve Vapnik, 1995; Sen vd., 2020: 104). İstatistiksel öğrenme teorisine dayanan Destek Vektör Makineleri (DVM), öğrenme sürecinde yalnızca eğitim hatasını azaltmaya değil, aynı zamanda modelin yeni verilere karşı genelleme yeteneğini artırmaya odaklanan bir yöntemdir. Lu vd. (2002) ve Sen vd.'ne (2020) göre, algoritma verileri n -boyutlu bir özellik uzayında temsil eder ve bu uzayda, farklı sınıflara ait örnekleri birbirinden ayıran en geniş marjlinli hiper-düzlemi oluşturmayı hedeflemektedir. Bu yaklaşım, aşırı öğrenme (overfitting) ve yetersiz öğrenme (underfitting) gibi klasik makine öğrenmesi sorunlarının önüne geçilmesini sağlamakta; sınıflandırma ve regresyon gibi görevlerde az veriyle bile yüksek doğrulukta sonuçlar üretebilmekte ve yapısal risk minimizasyonu ilkesi doğrultusunda, modelin karmaşıklığı ile öğrenme başarısı arasında denge kurarak tahminlerini gerçekleştirebilme gibi avantajlara sahiptir. Öte yandan algoritmanın büyük veri kümeleriyle çalıştırıldığında eğitim sürecinin uzun sürmesi; veriler arasında net bir sınıf ayrımı olmadığında ya da veri seti fazla gürültü içerdiğinde ise modelin doğruluk oranının düşme eğilimine sahip olması; n katlı çapraz doğrulama yaklaşımı ile çalıştırıldığında bazen işlem süresinin uzamasına ve sistem kaynaklarının daha yoğun kullanılmasına neden olabilmesi gibi dezavantajlara da sahiptir.

Cortes ve Vapnik (1995), Zhao vd. (2006) ile Agarwal vd. (2021) tarafından belirtildiği üzere destek vektör makineleri (DVM), hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sınıflandırma problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Temel amacı verileri yüksek boyutlu bir özellik uzayına dönüştürerek doğrusal bir ayırım gerçekleştirmektir. Bu işlem, giriş verilerinin doğrusal olmayan bir dönüşüm fonksiyonu aracılığıyla daha yüksek boyutlara taşınması ile yapılır. Böylece, doğrusal olarak ayrılamayan veriler bu yeni uzayda doğrusal olarak ayrılabilir hâle gelmektedir. DVM algoritmasının matematiksel formülasyonu ve karar fonksiyonu eşitlik (4.4),

(4.5), (4.6), (4.7), (4.8), (4.9) ve (4.10)'da açıklanarak sunulmuştur (Cortes ve Vapnik, 1995; Schölkopf ve Smola, 2002; Zhao vd., 2006; Agarwal vd., 2021).

Modelin eğitim serisi;

$$s = \{(\chi_i, \gamma_i) | \chi_i \in H, \gamma_i \in \{\pm 1\}, i = 1, 2, \dots, l\}, \text{şeklindedir.} \quad (4.4)$$

Burada χ_i gözlem vektörlerini, γ_i ise bu gözlemlere ait sınıf etiketlerini ifade etmektedir.

Modelin eğitimi sırasında amaç, iki sınıfı en iyi şekilde ayıracak geniş marjlinli bir hiper-düzlem belirlemektir. Bu süreç, aşağıdaki eşitlik (5)'te yer alan amaç fonksiyonu ile tanımlanmaktadır:

$$\min \Phi(w) = \frac{1}{2} \langle w \cdot w \rangle + C \sum_{i=1}^l \xi_i \quad (4.5)$$

Eşitlik (5)'te; w : karar sınırının yönünü belirleyen ağırlık vektörünü; C : Hatalı sınıflandırmalara karşı ne kadar ceza verileceğini belirleyen ceza parametresini; ξ_i : Her bir eğitim örneği için tolerans tanıyan, sıfırdan küçük olamayan hatayı; Φ : Giriş verilerini yüksek boyutlu bir özellik uzayına dönüştüren, doğrusal olmayan haritalama fonksiyonunu; $\langle w \cdot w \rangle$: w vektörünün iç çarpımını, karar düzleminin düzlüğünü yani marjin genişliğini ifade etmektedir. Bu fonksiyon aşağıdaki kısıtlamalar altında optimize edilmektedir ve bu süreç aşağıda gösterilmiştir.

$$y_i(\langle w \cdot \Phi(x_i) \rangle + b) \geq 1 - \xi_i, \xi_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, l \quad (4.6)$$

Buradaki $\Phi(x_i)$, giriş verilerini yüksek boyutlu bir özellik uzayına dönüştüren haritalama fonksiyonudur. Bu dönüşüm sayesinde, doğrusal olarak ayrılamayan örnekler, daha yüksek boyutlu bir uzayda doğrusal olarak ayrılabilir hâle gelmektedir.

Bu işlem ise çekirdek (kernel) fonksiyonu aracılığıyla yapılmaktadır. Özellikle dönüşümler Mercer teoremi'ne uygun olan çekirdekler kullanılarak gerçekleştirilir. Mercer çekirdeği, verileri gerçekten dönüştürmeden, yüksek boyutlu uzayda yapılacak hesapları giriş verileri üzerinden kolayca yapmayı sağlayan fonksiyonlardır. Mercer çekirdeği, pozitif yarı tanımlı bir simetrik fonksiyondur ve eşitlik (7)'de sunulmuştur.

$$K(x, y) = \Phi(x)^T \cdot \Phi(y) \quad (4.7)$$

Böylece, veriler yüksek boyutlu uzaya dönüştürülmeden doğrudan iç çarpımları üzerinden işlem yapılmaktadır. Bu optimizasyon problemi dual forma dönüştürülerek

çözölmekte ve burada çekirdek (kernel) fonksiyonları devreye girmektedir. Dual formdaki amaç fonksiyonu ve kısıtları eşitlik (8) ve eşitlik (9)'da sunulmuştur:

$$Max L(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \quad (4.8)$$

$$Kısıtlar: \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0 \quad 0 \leq \alpha_i \leq C \quad i = 0,1,2, \dots, l. \quad (4.9)$$

Burada, α_i :Lagrange çarpanlarını, y_i : sınıf etiketlerini, $K(x_i, x_j)$: çekirdek fonksiyonunu ifade etmektedir. Model eğitim tamamlandıktan sonra ise yeni bir verinin hangi sınıfa ait olduğunu belirlemek için karar fonksiyonu eşitlik (4.10)'da sunulmuştur.

$$f(x) = \text{sign} \left[\sum_{i=1}^l y_i \alpha_i K(x_i \cdot x) + b \right]. \quad (4.10)$$

Sınıflandırma problemlerinde etkili bir yöntem olan DVM, regresyon problemleri için de Destek Vektör Regresyonu (DVR) olarak uyarlanmıştır. Schölkopf vd. (1999) tarafından geliştirilen ve detaylı olarak Smola ve Schölkopf (2004) tarafından açıklanan DVR ise doğrusal ya da doğrusal olmayan regresyon problemlerini çözmek amacıyla destek vektör makineleri (DVM)'nin regresyon problemleri için geliştirilmiş bir versiyonudur (Witten ve Frank 2005: 235).

Lydia vd. (2016) DVR'nin temel amacını, giriş verileri x_i ile bunlara karşılık gelen hedef değerler d_i arasındaki ilişkiyi öğrenerek, hem hedef değerlere yakın sonuçlar üreten hem de aşırı karmaşık olmayan düz (sade) bir tahmin fonksiyonu oluşturmak olarak ifade etmektedirler. Destek vektör regresyonuna ait fonksiyon ve optimizasyon yapısına dair bilgiler ise eşitlik (4.11), (4.12), (4.13) ve (4.14)'te sunulmakta ve açıklanmaktadır (Witten vd., 2011; Kavitha vd., 2016; Lydia vd., 2016).

Regresyon fonksiyonu, özellik uzayında doğrusal biçimde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$f(x) = w \cdot \phi(x) + b \quad (4.11)$$

w : Ağırlık vektörünü, $\phi(x)$: giriş verisinin özellik uzayına dönüştürölmüş hâlini, b : modelin sabiti ise sapma terimini ifade etmektedir. Doğrusal DVR modelinin dual formda gösterimi ise eşitlik (12)'teki gibi ifade edilmektedir.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \langle x_i, x \rangle + b \quad (4.12)$$

α_i : Destek vektörlerine ait ağırlık katsayılarını, x_i : eğitim verisindeki destek vektörleri ve x : tahmin yapılacak veri vektörünü ve b : sapma terimini ifade etmektedir. Bu modelde, doğrusal olmayan problemlerde iç çarpım $\langle x_i, x \rangle$ yerine uygun bir çekirdek (kernel) fonksiyonu kullanılarak analiz gerçekleştirilebilir. Bu sayede doğrusal olmayan ilişkiler de DVR ile modellenenabilir hale gelmektedir.

DVR'nin optimizasyon problemi, modelin yapısal sadeliğini (yani fonksiyonun düzlüğünü) ve hata toleransını birlikte dikkate alan bir yapıdadır. Bu bağlamda, DVR'nin primal optimizasyon problemi eşitlik (4.13)'te ve ilgili kısıtlamalar ise eşitlik (14)'te sunulmuştur (Lydia vd., 2016: 118; Zhang ve Habibi, 2021: 2191).

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i + \xi_i^*) \quad (4.13)$$

$$\begin{cases} d_i - w \cdot z_i - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ w^T - z_i(x_i) + b - d_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \varepsilon, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

Eşitlik (4.13) ve eşitlik (4.14)'te yer alan;

d_i : i 'nci veri noktasına ait gerçek hedef değeri,

ε : Hata tolerans sınırını,

ξ_i, ξ_i^* : Pozitif sapmaları,

$z_i = \varphi(x_i)$: Giriş verisi x_i 'nin özellik uzayına dönüştürülmüş hâlini,

C : Modelin yapısal sadeliği ile hata toleransı arasındaki dengeyi belirleyen ceza parametresini ifade etmektedirler.

Bu yöntem ile, doğrusal regresyon problemlerinde doğrudan uygulanabilirken, doğrusal olmayan DVR modellerinde ise çekirdek (kernel) fonksiyonları aracılığıyla dual form çözülerek daha karmaşık örüntüler de analiz edilmektedir ve yaygın kullanılan temel çekirdek fonksiyonları arasında Polinom, Normalleştirilmiş Polinom, Radyal Tabanlı Fonksiyon (Gauss–RBF) ve Pearson VII (PUK) yer almaktadır (Smola ve Schölkopf, 2004). Tablo 4.3'te temel kernel fonksiyonları ve parametreleri sunulmuştur.

Tablo 4.3. Destek Vektör Makinelerinde Kullanılan Temel Kernel Fonksiyonları

Polinom Kernel	$K(x, y) = (x \cdot y + 1)^d$	Polinomun derecesi (d)
Normalleştirilmiş Polinom Kernel	$K(x, y) = \frac{((x \cdot y) + 1)^d}{\sqrt{((x \cdot x) + 1)^d ((y \cdot y) + 1)^d}}$	Polinomun derecesi (d)
Radyal Tabanlı Fonksiyon (Gauss-RBF)	$K(x, y) = e^{-\gamma \ x - x_i\ ^2}$	Kernel boyutu (γ)
Pearson VII (PUK) Kernel	$\frac{1}{\left[1 + \left(\frac{2 \cdot \sqrt{\ x - y\ ^2 \sqrt{2^{1/\omega} - 1}}}{\sigma} \right)^2 \right]^\omega}$	Pearson genişliği parametreleri (σ, ω)

Kaynak: Kavzoğlu ve Çölkesen (2010: 78).

WEKA yazılımında destek vektör regresyonu modeli oluşturmak için SMOReg (Sıralı Minimal Optimizasyona Dayalı Regresyon) algoritması kullanılmaktadır (Smola ve Schölkopf, 2004). WEKA’da SMOReg algoritması uygulanırken modelin doğrusal (lineer) olarak çalışmasını sağlamak için polinomsal kernel fonksiyonu seçilir ve üs (exponent) değeri ise (1.0) olarak belirlenir. Bu ayar sayesinde, $d=1$ olduğunda çekirdek fonksiyonu $K(x, y) = (x \cdot y + 1)^1 = K(x, y) = (x \cdot y) + 1$ şeklini alır. Bu durumda çekirdek fonksiyonu doğrusal hale gelmekte ve doğrusal DVR modelinin çalışmasına olanak tanımaktadır (Witten vd., 2011: 462). Bu açıdan, çalışmada DVR için SMOReg algoritması kullanılmış ve algoritma çalıştırılırken polinomsal kernel fonksiyonu seçilerek üs (exponent) değeri ise (1.0) olarak belirlenmiştir. WEKA’da doğrudan doğrusal kernel seçeneği bulunmadığından, bu ayar sayesinde polinomsal kernel, doğrusal kernel işlevi görmüş ve modelin doğrusal DVR olarak uygulanmasına imkân tanımıştır.

Sultana vd. (2020) çalışmasında, DVR regresyonu uygulanırken logaritması alınan verilerin, ortak bir ölçeğe getirilerek modelin daha tutarlı çalışmasını ve analiz sonuçlarının daha anlamlı biçimde karşılaştırılabilmesini sağlamak için standardizasyon işlemi gerçekleştirmiştir. Bir diğer çalışma ise Zhao vd. (2006) DVM modeli uygulamak için logaritması alınmış verileri normalizasyon işlemine tabi tutarak analizlerini gerçekleştirmiştir. Kısacası farklı ölçeklerdeki giriş değişkenlerinin makine öğrenmesi modellerinde düzgün çalışması ve modelin eğitim

performansının artırılması için verilerin ya (0 ile 1) veya (-1 ile 1) aralığına çekilerek normalizasyon yapılması; ya da değişkenlerin ortalaması 0, standart sapması 1 olacak şekilde yeniden ölçeklendirilmesiyle gerçekleştirilen standardizasyon yapılması yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir (Jiang, 2021: 184). Literatürde yer alan çalışmalarda (Tsantekidis vd., 2017; Li vd., 2019; Khaled vd., 2020; Park ve Hauschild, 2024) standardizasyon işleminin makine öğrenimi modellerinde başarılı tahminler elde ettiği belirtilmektedir.

Standardizasyon için z-score yöntemi uygulanmakta olup, formülü eşitlik (4.15)'te sunulmuştur (Han vd., 2011: 114).

$$v'_i = \frac{v_i - \bar{A}}{\sigma_A} \quad (4.15)$$

Eşitlikte; v'_i : orijinal veri noktasını, $\bar{A}$: özellik ortalamasını, σ_A : özellik standart sapmasını ifade etmektedir.

Bu çalışmada standardizasyon uygulanması tercih edilmiştir. Çalışma için standardizasyon işlemi, SMOreg algoritmasının uygulanması esnasında WEKA yazılımında yer alan “FilterType” seçeneği “Standardize” olarak belirlenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra Model, C=1.0 kompleksite parametresi ve 10-katlı çapraz doğrulama yöntemi ile çalıştırılmıştır.

SMOreg algoritması ile elde edilen modelin başarısını ölçmek için Korelasyon Katsayısı (CC), Ortalama Mutlak Hata (MAE), Kök Ortalama Kare Hata (RMSE), Göreli Mutlak Hata (RAE) ve Kök Göreli Kare Hata (RRSE) gibi çeşitli performans metrikleri kullanılmaktadır.

Korelasyon katsayısı (CC) değişkenler arasındaki ilişkiyi yansıtmaktadır. Bu değer -1 ile +1 arasında değişmekte ve +1'e yaklaştıkça pozitif yüksek ilişkiyi yansıtırken; -1'e yaklaştıkça negatif yüksek korelasyon ilişkisini yansıtmaktadır (Aydemir, 2019: 47). Korelasyon katsayısı formülasyonu eşitlik (4.16)'de sunulmuştur.

$$\text{Korelasyon Katsayısı (CC)} = P_{c_i c_i^*} \frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c_i}) (c_i^* - \bar{c_i^*})}{\sqrt{(\sum (c_i - \bar{c_i})^2) (\sum (c_i^* - \bar{c_i^*})^2)}} \quad (4.16)$$

Eşitlik (16)'da yer alan korelasyon katsayısı formülasyonunda; c_i : Gözlenen gerçek değeri, $\bar{c}_i$: gözlenen değerlerin ortalamasını, c_i^* : tahmin edilen değeri, $\bar{c}_i^*$: tahmin edilen değerlerin ortalamasını ifade etmektedir (Sing ve Jana, 2024: 5).

Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error- MAE), modelin doğrulama verisi üzerindeki tahminleriyle, gözlenen değerler arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalamasını hesaplayarak hata düzeyini ölçen değerlendirme kriteridir. Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Squared Error- RMSE), Tahmin edilen değerlerle gözlenen veriler arasındaki farkların kareleri alınarak hesaplanan RMSE, bu kare farkların ortalamasıyla elde edilir. RMSE ile MAE birlikte değerlendirildiğinde, modelin hata dağılımı ve değişkenliği konusunda daha ayrıntılı bilgi sağlar. RMSE değeri, her zaman MAE'ye eşit ya da ondan büyük olur. Bu iki ölçüt arasındaki farkın artması, modelin yaptığı hataların tutarsızlık sergilediğini göstermektedir (Aydın, 2018: 173). Göreli Mutlak Hata (Relative Absolute Error- RAE), bir modelin tahmin hatalarının ortalamasını, referans olarak kabul edilen basit ya da sezgisel bir modelin oluşturduğu hata ile karşılaştıran oransal bir ölçüttür (Wang vd., 2022: 6). Kök Göreli Kare Hata (Root Relative Squared Error-RRSE) değerinin 1'den küçük olması, modelin tahmin gücünün anlamlı olduğunu gösterir (Zhang ve Xue, 2021: 7).

RAE ve RRSE değerlerinin düşük olması, tahmin modelinin daha iyi performans gösterdiği anlamına gelmektedir (Zangenehmadar ve Moselhi, 2016). MAE, RMSE, RAE ve RRSE hesaplamalarına ilişkin formüller sırasıyla eşitlik (4.17), (4.18), (4.19) ve (4.20)'de sunulmuştur (Jeong vd., 2014: 76; Zhang ve Xue, 2021: 7; Fu vd., 2023: 7).

$$\text{Ortalama Mutlak Hata (MAE)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (4.17)$$

$$\text{Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.18)$$

$$\text{Göreli Mutlak Hata (RAE)} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{\sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}|} \quad (4.19)$$

$$\text{Göreli Mutlak Hata Karekökü (RRSE)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}} \quad (4.20)$$

Formüllerde yer alan y_i : gözlenen değerleri, $\hat{y}_i$: tahmin edilen değerleri ve $\bar{y}$: gözlenen değerlerin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir.

4.4.2. Araştırmanın Modeli

Destek Vektör Regresyonu için belirlenen çalışmanın modeli Ahmed vd. (2022), Dong vd. (2022), Magazzino vd. (2021), Lei vd. (2022), Li ve Haneklaus (2021), Appiah vd. (2018), Benli ve Peker (2018), Inglesi-Lotz ve Dogan (2018), Wang ve Zhao (2015) ve Shahbaz vd. (2015) çalışmalarından yararlanılarak; CO₂ emisyonlarına etki eden faktörler ülkelerin ekonomik, enerji durumu ve çevresel dinamiklerini dikkate alacak şekilde oluşturulmuştur.

Analizler öncesinde, değişkenler arasındaki ölçek farklılıklarını azaltmak için değişkenlerin doğal logaritması alınmıştır.

Araştırmanın SVR modeli eşitlik (4.21)'de sunulmuştur.

$$\ln(\text{CO}_2) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \langle x_i, \begin{bmatrix} \ln(\text{YET}) & \ln(\text{FET}) & \ln(\text{DT}) \\ \ln(\text{DYY}) & \ln(\text{GSYİH}) & \ln(\text{KENT}) \end{bmatrix} \rangle + b \quad (4.21)$$

şeklindedir.

Modelde;

a_i : SVR algoritması tarafından öğrenilen destek vektörlerine ait ağırlık katsayılarını,
 x_i : Eğitim verisindeki destek vektörlerini,

x : “ $\ln(\text{YET}), \ln(\text{FET}), \ln(\text{DT}), \ln(\text{DYY}), \ln(\text{GSYİH}), \ln(\text{KENT})$ ”: Bir gözlem için log-transform uygulanmış bağımsız değişkenlerin oluşturduğu giriş vektörünü,

b : Modelin sabiti sapma terimini ifade etmektedir.

Çalışmanın bağımsız değişkenlerini yenilenebilir enerji tüketimi ($\ln(\text{YET})$), fosil enerji tüketimi ($\ln(\text{FET})$), ekonomik büyüme ($\ln(\text{GSYİH})$), dış ticaret ($\ln(\text{DT})$), doğrudan yabancı yatırımlar ($\ln(\text{DYY})$) ve kentleşme ($\ln(\text{KENT})$) oluşturmaktadır.

4.5. Araştırmanın Bulguları

Araştırmanın bulguları 3 başlık altında sunulmuştur. İlk başlıkta araştırmada kullanılan bağımsız değişkenlere ilişkin tanımlayıcı istatistikler yer almaktadır. Bağımlı değişken olan kişi başına CO₂ emisyonlarına ait tanımlayıcı istatistikler ise X-Means kümeleme algoritması sonuçlarını açıklamak için kümeleme analizi sonuçları ile birlikte verilmiştir. İkinci başlıkta X-Means kümeleme algoritması

sonuçlarına ve üçüncü başlıkta ise Destek Vektör Regresyonu (DVR) sonuçlarına yer verilmiştir.

4.5.1. Araştırmanın Tanımlayıcı İstatistikleri

Çalışmada kullanılan RECAI kapsamındaki 32 ülkenin bağımsız değişkenlerine (YET, FET, DT, DYY, GSYİH ve KENT) ait tanımlayıcı istatistikler, ülkelerin alfabetik sıralamasına göre Tablo 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.4. Bağımsız Değişkenlere Ait Tanımlayıcı İstatistikler

Ülke	Değişkenler	Minimum	Maximum	Ortalama	Standart Sapma
ABD	YET	3105.653	8978.219	5239.591	1630.754
	FET	59346.547	82243.281	73328.419	7220.45
	DT	19.786	30.842	25.239	3.169
	DYY	0.465	3.406	1.603	0.742
	GSYİH	38637.84	65875.178	51894.929	7437.155
	KENT	75.701	83.298	80.043	2.119
Almanya	YET	651.492	9282.546	3997.598	2964.5
	FET	28553.773	45367.328	39007.206	4241.879
	DT	39.749	89.064	65.64	14.539
	DYY	-0.716	12.609	2.012	2.268
	GSYİH	30915.873	44336.778	37816.86	4549.496
	KENT	73.269	77.765	75.962	1.463
Arjantin	YET	1430.066	3141.663	2382.866	344.051
	FET	13653.088	20236.637	17298.625	2082.423
	DT	13.753	41.753	28.889	8.399
	DYY	0.585	8.461	2.221	1.355
	GSYİH	8729.823	14040.619	11738.303	1641.399
	KENT	87.328	92.463	90.188	1.554
Avustralya	YET	2645.212	9477.472	3932.199	1865.161
	FET	53381.38	69435.5	62684.741	4503.569
	DT	32.189	49.225	40.886	3.673
	DYY	-3.607	6.981	2.816	1.818
	GSYİH	36029.485	61583.919	50307.397	7834.069
	KENT	84.1	86.617	85.205	0.71
Belçika	YET	155.004	6881.586	2185.256	2256.047
	FET	41036.965	60190.098	53170.447	5451.473
	DT	109.013	191.996	145.299	20.834
	DYY	-7.666	47.36	9.93	14.779
	GSYİH	29967.394	44731.042	37891.546	4402.735
	KENT	96.461	98.189	97.446	0.513
Birleşik Krallık	YET	272.571	5865.491	2049.756	2002.927
	FET	21153.193	41158.355	34446.296	6891.18
	DT	45.3	68.881	55.866	6.002
	DYY	-2.645	12.079	3.605	3.396
	GSYİH	30441.481	47551.23	40877.478	5260.359
	KENT	78.112	84.642	80.756	2.19
Brezilya	YET	4772.604	8962.235	6362.74	1111.452
	FET	5673.835	10517.655	8051.808	1279.04
	DT	15.636	38.816	24.91	5.799
	DYY	0.322	5.034	2.78	1.297
	GSYİH	5973.983	9366.739	7796.314	1122.66
	KENT	74.69	87.788	82.753	3.766
Çin	YET	315.148	5377.483	1762.048	1518.039
	FET	6807.203	27129.266	16135.896	6902.057
	DT	25.95	64.479	42.325	10.082
	DYY	0.24	6.187	3.179	1.459
	GSYİH	975.463	12175.196	5199.539	3561.509
	KENT	27.312	64.57	45.393	11.801

Tablo 4.4. (devam) Bağımsız Değişkenlere Ait Tanımlayıcı İstatistikler

Ülke	Değişkenler	Minimum	Maximum	Ortalama	Standart Sapma
Danimarka	YET	658.51	14135.978	6191.632	4185.1
	FET	18640.746	53947.266	35091.834	9933.74
	DT	65.644	131.543	91.858	18.05
	DYY	-5.003	21.953	2.37	4.547
	GSYİH	39776.596	61295.982	50781.359	5660.822
	KENT	84.871	88.495	86.371	1.272
Endonezya	YET	122.599	1056.854	340.66	259.949
	FET	3388.224	9129.119	6086.023	1451.961
	DT	32.972	96.186	52.479	12.083
	DYY	-2.757	2.916	1.305	1.338
	GSYİH	1544.996	4192.624	2602.824	821.535
	KENT	31.613	58.572	46.69	8.02
Fas	YET	50.76	605.419	245.393	163.114
	FET	3208.67	6719.754	5113.812	1108.5
	DT	45.672	101.132	64.35	14.019
	DYY	0.664	6.444	2.057	1.171
	GSYİH	1680.71	3403.32	2535.719	594.911
	KENT	49.117	65.121	56.868	4.722
Finlandiya	YET	10518.476	21524.631	14472.997	3018.121
	FET	22978.654	52482.801	39707.598	7600.928
	DT	43.481	94.132	72.536	10.041
	DYY	-3.845	10.719	3.177	3.785
	GSYİH	27807.861	46359.873	39956.273	6182.932
	KENT	79.843	85.773	83.307	1.867
Fransa	YET	2795.184	6295.697	4037.969	851.616
	FET	17850.02	30310.66	25719.358	3811.524
	DT	41.726	75.79	56.835	8.219
	DYY	0.177	3.919	2.003	1.041
	GSYİH	28197.236	39117.485	34371.164	3353.7
	KENT	74.229	81.777	77.728	2.339
Güney Afrika	YET	10.151	878.718	258.01	257.326
	FET	21067.861	28061.143	24819.977	1668.538
	DT	34.321	65.975	50.202	8.654
	DYY	0.002	9.66	1.44	1.833
	GSYİH	4193.598	6170.877	5353.604	725.415
	KENT	52.554	68.819	60.635	4.988
Güney Kore	YET	152.576	3186.719	795.425	906.862
	FET	23276.723	59526.273	46820	10205.334
	DT	46.919	105.566	72.931	16.984
	DYY	0.212	2.156	0.901	0.487
	GSYİH	10274.483	34121.021	22503.509	7422.937
	KENT	74.972	81.936	80.343	1.898
Hollanda	YET	196.848	9637.402	2226.122	2344.621
	FET	43976.91	67602.75	60058.736	5697.341
	DT	99.033	184.107	132.176	23.341
	DYY	-30.778	85.979	13.058	23.657
	GSYİH	31820.831	51777.543	42458.068	5748.776
	KENT	69.329	93.179	83.075	7.816
Hindistan	YET	194.869	734.073	360.015	158.527
	FET	2467.075	6768.019	4269.478	1320.47
	DT	16.988	55.794	37.073	12.295
	DYY	0.027	3.621	1.288	0.813
	GSYİH	531.898	2236.313	1171.443	518.521
	KENT	25.778	36.364	30.278	3.216

Tablo 4.4. (devam) Bağımsız Değişkenlere Ait Tanımlayıcı İstatistikler

Ülke	Değişkenler	Minimum	Maximum	Ortalama	Standart Sapma
İrlanda	YET	602.224	7972.436	2907.801	2451.26
	FET	27773.898	47042.203	36968.151	5727.204
	DT	106.44	250.108	176.522	41.148
	DYY	-25.385	74.745	11.877	16.657
	GSYİH	23797.207	99677.473	51731.29	20400.662
	KENT	57.073	64.466	60.77	2.21
İsrail	YET	3.589	2383.353	372.409	625.744
	FET	26555.662	40235.309	34778.471	2889.32
	DT	51.151	79.608	63.574	7.67
	DYY	0.488	9.07	3.102	1.899
	GSYİH	22627.627	42852.581	32000.945	5670.054
	KENT	90.463	92.854	91.658	0.676
İspanya	YET	1482.312	8247.912	4437.502	2020.759
	FET	20081.115	34149.461	26682.152	3971.437
	DT	35.521	78.628	56.126	10.031
	DYY	0.638	6.773	2.924	1.363
	GSYİH	19394.493	28569.844	24701.173	2819.17
	KENT	75.528	81.552	77.999	1.942
İsveç	YET	18232.84	31525.06	25632.493	3109.756
	FET	14585	31789.42	23889.83	5178.852
	DT	50.852	106.366	80.474	12.674
	DYY	-1.045	22.933	4.45	4.478
	GSYİH	32786.88	54878.292	45261.85	7000.514
	KENT	83.204	88.738	85.284	1.676
İsviçre	YET	10956.92	17197.82	13802.897	1437.47
	FET	15448.01	26439.17	22395.835	3469.445
	DT	76.155	140.17	106.719	20.185
	DYY	-32.547	24.248	2.08	10.491
	GSYİH	67079.464	90043.41	78041.996	7441.259
	KENT	73.375	74.202	73.664	0.204
İtalya	YET	2148.726	5766.937	3634.385	1356.642
	FET	22201.4	35372.855	29707.575	4258.946
	DT	33.801	72.053	50.728	8.294
	DYY	-0.894	2.983	0.974	0.925
	GSYİH	27987.433	34345.76	31526.309	1886.672
	KENT	66.706	71.973	68.474	1.602
Japonya	YET	1859.257	4934.278	2853.452	812.344
	FET	32709.631	41083.32	38175.984	2237.897
	DT	15.723	46.844	27.384	8.73
	DYY	-0.052	1.238	0.36	0.322
	GSYİH	29232.44	36990.33	32902.512	2278.706
	KENT	77.473	92.043	85.8	5.992
Kanada	YET	3.589	93578.22	8103.367	15434.401
	FET	2467.075	78919.539	27925.963	16929.869
	DT	13.753	250.108	71.586	39.936
	DYY	-40.263	106.428	3.729	9.175
	GSYİH	531.898	99677.473	28785.777	21207.304
	KENT	25.778	98.189	74.515	15.609
Macaristan	YET	59.213	2734.039	800.765	783.788
	FET	18263.344	26220.771	22862.714	2090.24
	DT	53.561	185.271	132.28	38.842
	DYY	-40.263	106.428	11.413	27.04
	GSYİH	7326.161	16343.059	11114.854	2731.852
	KENT	64.575	72.864	67.962	2.837

Tablo 4.4. (devam) Bağımsız Değişkenlere Ait Tanımlayıcı İstatistikler

Ülke	Değişkenler	Minimum	Maximum	Ortalama	Standart Sapma
Meksika	YET	762.694	1727.201	1127.4	225.095
	FET	14507.214	18173.977	16385.121	1245.096
	DT	26.163	88.387	57.248	15.82
	DYY	0.828	3.837	2.43	0.663
	GSYİH	7970.64	10296.869	9404.162	643.391
	KENT	71.816	81.582	76.866	2.907
Mısır	YET	405.252	600.903	502.066	55.897
	FET	5914.896	10293.006	8381.827	1443.419
	DT	29.857	71.681	46.579	10.756
	DYY	-0.205	9.349	2.319	2.22
	GSYİH	1940.1	4111.249	2888.209	647.792
	KENT	42.658	43.345	42.908	0.166
Norveç	YET	65694.48	93578.22	75711.347	6111.48
	FET	28196.83	37747.07	33685.119	2856.264
	DT	65.354	82.605	70.307	3.581
	DYY	-5.033	6.161	2.054	2.218
	GSYİH	51233.036	79434.626	69919.42	7900.353
	KENT	72.265	83.995	78.238	3.499
Şili	YET	2950.35	7840.368	4705.213	1035.416
	FET	9793.925	19188.342	16320.872	2802.331
	DT	53.215	80.677	62.699	7.77
	DYY	1.896	11.91	5.803	2.693
	GSYİH	5664.528	14272.271	10595.118	2735.139
	KENT	83.398	88.012	86.447	1.323
Türkiye	YET	1099.693	4271.088	2242.637	944.408
	FET	9141.189	19310.203	14173.392	3313.899
	DT	30.476	81.17	50.271	10.77
	DYY	0.305	3.623	1.24	0.838
	GSYİH	5101.207	14713.567	8605.238	2883.572
	KENT	59.976	77.463	68.917	5.445
Yunanistan	YET	624.246	6387.6	2431.032	1685.728
	FET	21708.766	36543.754	29298.879	4122.899
	DT	35.22	107.679	57.261	17.655
	DYY	-0.197	3.631	1.055	0.866
	GSYİH	15374.863	23973.694	18936.455	2513.159
	KENT	71.635	80.673	75.488	2.981

Tablo 4.4'e göre yenilenebilir enerji tüketimi (YET)'nin en yüksek ortalama değere sahip olduğu ülke Norveç'tir. Onu sırasıyla İsveç, Finlandiya ve İsviçre ülkeleri takip etmektedir. En düşük ortalama değer ise Fas, Güney Afrika, Hindistan, Endonezya ve Mısır'a aittir. Fosil enerji tüketimi (FET) değişkeninin en yüksek ortalama değere sahip olduğu ülkeler ABD, Avustralya ve Hollanda'dır. En düşük ortalama değere sahip olduğu ülkeler Hindistan, Brezilya, Mısır ve Arjantin'e aittir. Dış ticaret (DT) değişkenine ait en yüksek ortalama değere İrlanda, İsviçre, Belçika ve Hollanda ülkelerine; en düşük ortalama değere Kanada, Norveç, Finlandiya, Güney Kore ve Almanya'ya aittir. Doğrudan yabancı yatırımlar (DYY) değişkenine ilişkin en yüksek ortalama değere Macaristan, İrlanda, Hollanda ve Belçika'ya aittir; Japonya, İtalya, Güney Kore, Hindistan,

Türkiye ve Endonezya ise en düşük ortalama değerlere sahiptir. Ekonomik büyüme (GSYİH) değişkenine ait en yüksek ortalama değer İsviçre'ye aittir. Onu Norveç, ABD, İrlanda ve Avustralya izlemektedir. Hindistan, Endonezya, Fas, Mısır ve Güney Afrika ise en düşük ortalama değere sahip olan ülkelerdir. Kentleşme (KENT) değişkenine ait en yüksek ortalama değere sahip olan ülke ise Belçika'dır. İsrail, Arjantin, İsveç, Şili, ABD ve Avustralya ülkeleri de kentleşme oranı ortalaması yüksek olan diğer ülkeler arasında yer almaktadır. Hindistan, Mısır ve Endonezya ülkeleri ise en düşük kentleşme oranı ortalamasına sahip ülkelerdir.

4.5.2. Kümeleme Analizi Bulguları

Küme sayısının otomatik olarak belirlenmesi için alt sınır 2, üst sınır 10 olarak belirlendikten sonra X-means algoritması uygulanmış ve algoritma en uygun küme sayısını 4 olarak belirlemiştir. Tablo 4.5'te X-Means kümeleme algoritması sonucu elde edilen kümeler ve ülkelerin kümelere dağılımları sunulmuştur.

Tablo 4.5. X-Means Algoritması Sonucu Elde Edilen Kümeler ve Ülkelerin Dağılımı

Küme 0 (3 Ülke)	Küme 1 (12 Ülke)	Küme 2 (8 Ülke)	Küme 3 (9 Ülke)
• Amerika Birleşik Devletleri (ABD) • Avustralya • Kanada	• Birleşik Krallık • Güney Afrika • Güney Kore • Almanya • Belçika • Danimarka • Finlandiya • Hollanda • İrlanda • İsrail • Japonya • Norveç	• Çin • İspanya • İtalya • Yunanistan • Fransa • İsveç • İsviçre • Macaristan	• Arjantin • Brezilya • Endonezya • Fas • Meksika • Mısır • Şili • Türkiye • Hindistan

Tablo 4.5'e göre, Küme 0'da Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Avustralya ve Kanada; Küme 1'de Birleşik Krallık, Güney Afrika, Güney Kore, Almanya, Belçika, Danimarka, Finlandiya, Hollanda, İrlanda, İsrail, Japonya ve Norveç; Küme 2'de Çin, İspanya, İtalya, Yunanistan, Fransa, İsveç, İsviçre ve Macaristan; Küme 3'te Arjantin, Brezilya, Endonezya, Fas, Meksika, Mısır, Şili, Türkiye ve Hindistan yer almaktadır.

Çalışmada kümeleme analizinin kişi başına CO₂ emisyonları üzerinden gerçekleştirilmesinin sebebi, çalışma modelindeki bağımlı değişken ile aynı olmasını sağlamaktır. Böylece, kümeleme ve regresyon analizleri arasında doğrudan bir bağlantı kurulmuş, analizlerin birbirleriyle daha tutarlı ve bütüncül bir şekilde gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte analiz sonucu oluşan kümeler incelenirken, ülkelerin karbon emisyonlarına dair genel görünümün tam olarak yansıtılamayabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Kişi başına CO₂ emisyonu, ülkeler arasındaki karbon salınımını karşılaştırmada yaygın olarak kullanılan bir ölçüt olsa da toplam emisyon miktarını nüfusa bölerek hesaplandığı için, büyük nüfuslu ülkelerde emisyon seviyeleri düşük görünebilirken, nüfusu az ancak yüksek enerji tüketimine sahip ülkelerde değerler yapay olarak yüksek çıkabilmektedir. Örneğin Çin ve Hindistan gibi büyük nüfuslu ülkeler, toplamda en fazla emisyon üreten ülkeler arasında olmasına rağmen, kişi başına hesaplama yapıldığında daha düşük emisyon seviyelerine sahip olduğu görünmektedir. Buna karşılık, Kanada veya Avustralya gibi geniş yüz ölçümüne ve düşük nüfus yoğunluğuna sahip ülkeler, enerji yoğun sektörleri nedeniyle yüksek kişi başına emisyon değerleri sergilemektedir. Buna göre, X-Means algoritması tarafından oluşturulan kümelerde yer alan ülkeler sadece, kişi başına CO₂ emisyon yapıları genel olarak benzerlik gösteren ve kişi başına CO₂ emisyonu açısından ortak dinamiklere sahip olan ülkelerdir. Kümeleme sonucu, ülkelerin genel emisyon değerleri açısından kesin bir yargı vermemektedir.

Aşağıda kümeleme algoritması sonucu elde edilen her bir küme için ülkelerin kişi başına CO₂ emisyon miktarlarına ait tanımlayıcı istatistik değerlerine yer verilmiştir. Böylelikle kümelerde yer alan ülkelerin kişi başına CO₂ emisyon miktarları açısından ortak yönleri belirlenerek kümeler isimlendirilmiştir.

Küme 0: Kişi Başına Yüksek CO₂ Emisyon Miktarına Sahip Ülkeler

X-Means algoritması ile elde edilen Küme 0'da ABD, Avustralya ve Kanada ülkeleri yer almaktadır. Tablo 4.6'da Küme 0 ülkelerinin kişi başına CO₂ emisyon değerlerine ait tanımlayıcı istatistik değerleri sunulmuştur.

Tablo 4.6. Küme 0 Ülkeleri için Kişi Başına CO₂ Emisyon Değerlerine Ait Tanımlayıcı İstatistikleri

Ülke	Minimum	Maximum	Ortalama	Standart Sapma
ABD	13.471	21.013	18.035	2.389
Avustralya	14.015	19.237	17.403	1.482
Kanada	14.340	18.130	16.476	1.025

Tablo 4.6'ya göre, Küme 0'da yer alan ABD, Avustralya ve Kanada'nın yüksek kişi başına CO₂ emisyon değerlerine sahip olduğu görülmektedir. ABD'de kişi başına CO₂ emisyonları 13.471-21.013 ton arasında değişirken, ortalama 18.035 ton olarak hesaplanmıştır. Avustralya'da bu değerler 14.015-19.237 ton aralığında olup, ortalama 17.403 tondur. Kanada'da ise 14.34-18.13 ton aralığında değişen kişi başına CO₂ emisyon değerleri, ortalama olarak 16.476 ton olarak belirlenmiştir. Ülkelerin kişi başına CO₂ emisyon değerlerine ait standart sapma değerlerine bakıldığında ise ülkeler arasında küçük farklar gösterse de emisyon seviyelerinin genel olarak benzer dalgalanmalar sergilediği görülmektedir. Bu açıdan çalışmada, kümeleme analizi sonucu elde edilen Küme 0, "Kişi Başına Yüksek CO₂ Emisyonlu Ülkeler" olarak adlandırılmıştır.

Küme 1: Kişi Başına Orta-Yüksek CO₂ Emisyon Miktarına Sahip Ülkeler

X-Means algoritması kullanılarak hesaplanan Küme 1'de Birleşik Krallık, Güney Afrika, Güney Kore, Almanya, Belçika, Danimarka, Finlandiya, Hollanda, İrlanda, İsrail, Japonya ve Norveç ülkeleri yer almaktadır. Tablo 4.7'de Küme 1 ülkelerinde, kişi başına CO₂ emisyon değerlerine ait tanımlayıcı istatistik değerleri sunulmuştur.

Tablo 4.7. Küme 1 Ülkeleri için Kişi Başına CO₂ Emisyon Değerlerine Ait Tanımlayıcı İstatistikleri

Ülke	Minimum	Maximum	Ortalama	Standart Sapma
Birleşik Krallık	4.420	10.300	7.955	1.842
Güney Afrika	6.286	9.545	7.900	0.805
Güney Kore	6.909	13.003	10.764	1.724
Almanya	7.00	12.398	10.045	1.215
Belçika	7.152	12.544	10.439	1.634
Danimarka	4.502	14.063	8.834	2.704
Finlandiya	5.779	14.213	10.539	2.153
Hollanda	6.873	12.100	10.444	1.255
İrlanda	6.120	11.910	9.237	1.646
İsrail	6.278	9.818	8.426	1.033
Japonya	7.587	10.410	9.558	0.615
Norveç	7.935	10.471	9.184	0.606

Tablo 4.7'ye göre, Küme 1 ülkeleri olan Birleşik Krallık, Güney Afrika, Güney Kore, Almanya, Belçika, Danimarka, Finlandiya, Hollanda, İrlanda, İsrail, Japonya ve Norveç ülkelerinin kişi başına orta-yüksek CO₂ emisyon değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Küme 1 ülkelerinin kişi başına CO₂ emisyon değerleri genel olarak 7 ile 10 ton arasında değişmekte olup, ülkeler arasında farklı minimum ve maksimum değerler görülse de ortalama emisyon seviyelerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Güney Kore, Almanya, Belçika, Hollanda ve Finlandiya ortalama 10 tonluk emisyon değerleriyle kümenin üst sınırında yer alırken, Birleşik Krallık, Güney Afrika ve İsrail daha düşük seviyelerde kişi başına CO₂ emisyonuna sahiptir. Çalışma kapsamında Küme 1, kişi başına CO₂ emisyon değerleri incelendiğinde "Kişi Başına Orta-Yüksek CO₂ Emisyonlu Ülkeler" olarak adlandırılmıştır.

Küme 2: Kişi Başına Orta CO₂ Emisyon Miktarına Sahip Ülkeler

Küme 2'de Çin, İspanya, İtalya, Yunanistan, Fransa, İsveç, İsviçre ve Macaristan ülkeleri yer almaktadır. Tablo 4.8'de Küme 2 ülkelerinde, kişi başına CO₂ emisyon değerlerine ait tanımlayıcı istatistik değerleri sunulmuştur.

Tablo 4.8. Küme 2 Ülkeleri İçin Kişi Başına CO₂ Emisyon Değerlerine Ait Tanımlayıcı İstatistikleri

Ülke	Minimum	Maximum	Ortalama	Standart Sapma
Çin	2.216	9.399	5.521	2.510
İspanya	4.494	8.486	6.505	1.116
İtalya	4.978	8.540	7.014	1.113
Yunanistan	4.895	9.594	7.588	1.420
Fransa	4.136	7.008	5.830	0.831
İsveç	3.359	7.664	5.584	1.329
İsviçre	3.850	6.930	5.655	0.885
Macaristan	4.527	6.596	5.553	0.584

Tablo 4.8'e göre, Küme 2 ülkeleri olan Çin, İspanya, İtalya, Yunanistan, Fransa, İsveç, İsviçre ve Macaristan kişi başına orta düzeyde CO₂ emisyon değerlerine sahiptir. Ülkelerde kişi başına düşen CO₂ emisyonlarının ortalama değerleri genel olarak 5.5 ile 7.5 ton arasında değişmekte olup, minimum ve maksimum değerler ülkeler arasında farklılık gösterse de ortalama emisyon seviyelerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. En yüksek ortalama emisyon değerine 7.588 ton ile Yunanistan sahipken, en düşük ortalama değer 5.521 ton ile Çin'e aittir. Standart sapma değerleri göz önüne alındığında, Macaristan ve İsviçre'nin emisyon seviyelerinde görece daha az değişim görülürken, Çin'in 2.51'lik standart sapma değeriyle zaman içinde daha değişken emisyon seviyeleri sergilediği anlaşılmaktadır. Bu değerler açısından çalışmada Küme 2 "Kişi Başına Orta CO₂ Emisyonlu Ülkeler" olarak adlandırılmıştır.

Küme 3: Kişi Başına Düşük CO₂ Emisyon Miktarına Sahip Ülkeler

Küme 3'te Arjantin, Brezilya, Endonezya, Fas, Meksika, Mısır, Şili, Türkiye Hindistan ülkeleri yer almaktadır. Tablo 4.9'da Küme 3 ve ülkelerinde kişi başına CO₂ emisyon değerlerine ait tanımlayıcı istatistik değerleri sunulmuştur.

Tablo 4.9. Küme 3 Ülkeleri İçin Kişi Başına CO₂ Emisyon Değerlerine Ait Tanımlayıcı İstatistikleri

Ülke	Minimum	Maximum	Ortalama	Standart Sapma
Arjantin	3.178	4.538	3.930	0.443
Brezilya	1.547	2.730	2.102	0.310
Endonezya	0.935	2.399	1.679	0.419
Fas	0.949	1.984	1.481	0.322
Meksika	3.374	4.333	3.947	0.257
Mısır	1.450	2.527	2.071	0.348
Şili	2.327	4.960	3.886	0.779
Türkiye	2.675	5.474	3.996	0.898
Hindistan	0.731	2.055	1.281	0.421

Tablo 4.9'a göre, Arjantin, Brezilya, Endonezya, Fas, Meksika, Mısır, Şili, Türkiye ve Hindistan'ın kişi başına düşen karbon emisyonları genel olarak düşük seviyede seyretmektedir. Ülkelerde kişi başına emisyon miktarı ortalama değerleri, 1 ile 4 ton arasında değişmektedir. Sadece Türkiye'de ise maximum değer 5 ton ve üzeri gerçekleştiği görülmektedir. En yüksek ortalama emisyon değeri 3.996 ton ile Türkiye'ye aitken, onu 3.947 ton ile Meksika, 3.886 ile Şili ve 3.93 ton ile Arjantin takip etmektedir. Buna karşılık, en düşük kişi başına ortalama CO₂ emisyonu Hindistan'da 1.281 ton olarak ölçülmüş olup, Fas'ta 1.481 ton ve Endonezya'da 1.679 ton olarak hesaplanmıştır. Standart sapma değerleri incelendiğinde, Türkiye (0.90) ve Şili (0.78) zaman içinde daha değişken emisyon seviyeleri sergilerken, Meksika (0.26) ve Arjantin (0.44) daha istikrarlı bir emisyon eğilimi göstermektedir. Genel anlamda ülkeler farklı kalkınma seviyelerine sahip ülkeler olarak görülseler de kişi başına CO₂ emisyon seviyeleri açısından diğer kümelere göre daha düşük bir profil sergileyen ülkeler olmuştur. Bu açıdan dolayı çalışmada Küme 3 "Kişi Başına Düşük CO₂ Emisyonlu Ülkeler" olarak adlandırılmıştır.

4.5.3. Destek Vektör Regresyonu Bulguları

Bu bölümde destek vektör regresyonu analizi sonuçları; Küme 0, Küme 1, Küme 2 ve Küme 3 şeklinde sıralanarak, her bir kümedeki ülkelere ait sonuçlara yer verilmiştir.

Küme 0 Ülkeleri için DVR Bulguları

X-Means algoritması kullanılarak gerçekleştirilen kümeleme analizi sonucunda, Küme 0’da yer alan ülkeler ABD, Avustralya ve Kanada olarak tespit edilmiştir. Tablo 4.10’da ABD için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları sunulmuştur.

Tablo 4.10. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: ABD

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0089	Negatif
ln(YET)	-0.234	Negatif
ln(FET)	0.7612	Pozitif
ln(DT)	0.063	Pozitif
ln(DYY)	0.0289	Pozitif
ln(GSYİH)	-0.1783	Negatif
ln(KENT)	0.1202	Pozitif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.996
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.01
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0123
Görelî Mutlak Hata (RAE)		7.7859 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		8.7168 %

Tablo 4.10’a göre, modelin yüksek korelasyon katsayısı (0.996), güçlü bir doğrusal ilişki ve yüksek tahmin doğruluğunu göstermektedir. Düşük hata oranları (MAE: 0.01, RMSE: 0.0123, RAE: %7.7859, RRSE: %8.7168) ise modelin başarılı performans sergilediğini belirtmektedir.

ABD’de ln(FET), ln(DT), ln(DYY) ve ln(KENT) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)’de sırasıyla (0.7612), (0.063), (0.0289) ve (0.1202) standart sapmalık artışa yol açmaktadır. Bu sonuçlara göre, ABD’de kişi başına CO₂ emisyonlarını en fazla artıran unsur fosil enerji tüketimidir. Nitekim 2023 yılı itibarıyla fosil enerji tüketiminin birincil enerji tüketimi içindeki payı %80,58’dir (Our World in Data, 2024f). Oran, ülkede fosil yakıtlara olan yüksek bağımlılığın sürdüğünü göstermekte ve model sonucunda elde edilen yüksek pozitif etkinin gerekçesini desteklemektedir. 1991-2022 yılları arasında ABD’nin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %-2,1’den %11,1’e yükselmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu durum, ülkenin net karbon ithalatçısı hâline geldiğini göstermektedir. 2024 yılında ABD’nin en fazla

ihracat yaptığı ürün grupları petrol yağları, ham petrol, petrol gazları, otomobiller, elektronik entegre devreler, serum ve aşılar, karayolu taşıtları için aksam ve parçalar, altın, dozlandırılmış ilaçlar ve soya fasulyesidir. En fazla ithalat yaptığı ürünler ise petrol, telefon cihazları, bilgisayarlar, dozlandırılmış ilaçlar, karayolu taşıtları için aksam ve parçalar, petrol yağları, serum ve aşılar, elektronik entegre devreleridir (MFA, t.y.-b). ABD incelenen dönemde net karbon ithalatçısı konumunda olmasına karşın, ihracat sepetinde yüksek karbon yoğunluğuna sahip ürünlerin (örneğin petrol, ham petrol, petrol gazları, otomobiller) önemli bir paya sahip olması, dış ticaretin ülkede kişi başına CO₂ emisyonları üzerinde artırıcı yönde bir etki yaratmasına neden olduğunu göstermektedir. Doğrudan yabancı yatırımların kişi başına CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi (0.0289) ise oldukça düşüktür. 1991-2023 yılları arasında ABD’de DYY’nin GSYİH’ye oranı %0,56’dan %1,26’ya çıkmıştır (Our World in Data, 2024h). ABD gibi büyük bir ekonomiye sahip olan ülkeye dışarıdan gelen doğrudan yabancı yatırımların görece sınırlı kaldığı ve bu yatırımlar en çok imalat sektörüne yönelik gerçekleşmiştir (Bureau of Economic Analysis [BEA], 2024). Bu açıdan ABD gibi büyük bir ekonomiye sahip bir ülkeye yapılan doğrudan yabancı yatırımların görece sınırlı olması ve mevcut yatırımların büyük ölçüde imalat sektörü üzerine olması, analiz sonucundaki kısıtlı artırıcı etkiyi (0.0289) açıklar niteliktedir. Kentleşme değişkeninin modeldeki artırıcı etkisi (0.1202) diğerlerine kıyasla daha belirgindir. 2023 yılında ülkedeki kentleşme oranı %85,8’dir (Our World in Data, 2024i). Kentleşmenin yüksek düzeyi özellikle ulaşım, konut ve enerji talebini artırarak kişi başına karbon emisyonlarını artırıcı bir etki yaratabilmektedir. Nitekim ABD’de 2022 yılında ulaştırmadan kaynaklı sera gazı emisyonları, ABD’nin toplam sera gazı emisyonlarının %29’unu oluşturması bu duruma örnek teşkil etmektedir (United States Environmental Protection Agency [EPA], 2025). ABD’deki yüksek kentleşme oranı model sonucunu destekleyici niteliktedir.

Öte yandan $\ln(YET)$ ve $\ln(GSYİH)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, kişi başına CO₂ emisyonlarında sırasıyla (-0.234) ve (-0.1783) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. ABD’de karbon emisyonlarını azaltan en etkili değişken yenilenebilir enerji tüketimidir. ABD’de yenilenebilir enerjinin birincil enerji tüketimindeki payı 1991 yılında %4,72 iken 2023’te %11,66’ya yükselmiştir (Our World in Data, 2024j). Bu artış, yenilenebilir enerjiye yönelimin artmakta olduğunu ve analizde elde edilen emisyonları azaltıcı etkinin uygulanan enerji

dönüşüm politikalarıyla uyumlu olduğunu göstermektedir. ABD’de 1991-2022 yılları arasında kişi başına GSYİH %119 artarken, kişi başına CO₂ emisyonları %0 ve tüketim temelli CO₂ emisyonları ise %14 artmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu durum ülkede ekonomik büyümenin karbon emisyonlarından büyük ölçüde ayrıştığını ve daha sürdürülebilir bir büyüme sürecine girildiğini göstermektedir. Modelin sabiti olan sapma terimi (-0.0089), tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu durumda, tahmin edilen CO₂ değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak, ABD’de kişi başına karbon emisyonlarını en çok artıran değişkenin fosil enerji tüketimi; en çok azaltan değişkenin ise yenilenebilir enerji kullanımı olduğu görülmektedir. Avustralya için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.11’de sunulmuştur.

Tablo 4.11. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Avustralya

Değişkenler	Ağırlık Katsayısı (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0171	Pozitif
ln(YET)	-0.6615	Negatif
ln(FET)	0.3447	Pozitif
ln(DT)	-0.1017	Negatif
ln(DYY)	-0.0183	Negatif
ln(GSYİH)	0.5789	Pozitif
ln(KENT)	-0.2512	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9696
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0178
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0212
Görelî Mutlak Hata (RAE)		23.2687 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		23.6939 %

Tablo 4.11’e göre, modelin korelasyon katsayısının (0.9696) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu; düşük hata oranları (MAE: 0.0178, RMSE: 0.0212, RAE: %23.2687, RRSE: %23.6939) ise modelin tahmin performansının genel olarak başarılı olduğunu göstermektedir.

Avustralya’da ln(FET) ve ln(GSYİH) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)’de sırasıyla (0.3447) ve (0.5789) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Özellikle ekonomik büyüme, karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, ekonomik büyümenin çevresel

maliyetlerini beraberinde getirdiğini ortaya koymaktadır. Avustralya'nın kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %153 oranında artarken, kişi başına CO₂ emisyonları yalnızca %38, tüketim temelli emisyonlar ise %39 artmıştır (Our World in Data, 2024k). Değerler analiz sonucu elde edilen ekonomik büyümenin ülkede emisyonları artırdığı sonucuyla örtüşmektedir. Fosil enerji tüketimi de analiz sonucunda kişi başına CO₂ emisyonlarını artıran bir diğer önemli faktör olarak öne çıkmaktadır. 2023 yılı itibarıyla ülkenin birincil enerji tüketimi içerisinde fosil yakıtların payı %85,02'dir (Our World in Data, 2024f). Bu yüksek oran, analizde fosil enerji tüketiminin kişi başına CO₂ emisyonlarını artırdığı yönündeki bulguları desteklemektedir.

Diğer yandan $\ln(YET)$, $\ln(DT)$, $\ln(DYY)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.6615), (-0.1017), (-0.0183) ve (-0.2512) standart sapmalılık azalışa yol açmaktadır. Değişkenler arasında karbon emisyonlarını en fazla azaltan unsur yenilenebilir enerji tüketimidir. Avustralya'da yenilenebilir kaynakların birincil enerji tüketimi içindeki payı 1991 yılında %4,66 iken 2023'te %14,98'e yükselmiştir (Our World in Data, 2024j). Meydana gelen bu artış modelde elde edilen azaltıcı etkinin somut bir enerji dönüşümü süreciyle desteklendiğini göstermektedir. Ülkenin 2023 yılında kentleşme oranı %91,2'dir (Our World in Data, 2024i). Yüksek kentleşme oranı ile birlikte ülkede sürdürülebilir kentleşme politikalarının yürütülmesi (Webb vd., 2024) ülkedeki kentleşmenin CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkisini destekler niteliktedir. Avustralya'da 1991-2022 döneminde dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %-12,8'den %-11,8'e yükselmiştir (Our World in Data, 2024g). Oranlar ülkenin net karbon ihracatçısı olduğunu ancak bu konumunun zayıfladığını göstermektedir. Avustralya'nın en çok ihracat yaptığı ürünler demir cevherleri ve konsantreleri, taşkömürü, taşkömüründen elde edilen briketler, topak vb. katı yakıtlar, altın, petrol gazları, ham petrol, petrol yağları ve buğdaydır. Özellikle tarım ürünlerinin %65'ini ihraç etmektedir; en çok ithalat yaptığı ürünler ise petrol yağları ve bitümenli minerallerden elde edilen yağlar, rafine petrol, makinalar, kazanlar, otomobil, elektrik-elektronik ekipmanlar, ilaçlar ve altındır (MFA, t.y.-c). Analiz sonucu dış ticaretin emisyonlar üzerindeki azaltıcı etkisi ülkenin ithal ettiği ürünlerin görece düşük karbon yoğunluğuna sahip, yüksek katma değerli ve üretim sürecindeki emisyon yükünün büyük ölçüde yurtdışında gerçekleştiği ürünlerden

oluşmasından kaynaklanıyor olabileceğini söylemek mümkündür. Doğrudan yabancı yatırımların GSYİH'ye oranı ise ülkede, 1991-2023 arasında %0,80'den %1,88'e yükselmiştir (Our World in Data, 2024h). Sınırlı bir artış olsa da ülkeye yapılan DYY'lerin önemli bir kısmı yenilenebilir enerji yatırımlarına yönelik gerçekleşmektedir (Austrade, 2023). Ülkedeki bu durum, analiz sonucu elde edilen DYY'nin kişi başına CO₂ emisyonlarının kısıtlı da olsa azaltıcı etkisini açıklar niteliktedir. Modelin sabiti olan sapma terimi (0.0171), tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu durumda, tahmin edilen CO₂ emisyon değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak Avustralya'da kişi başına karbon emisyonlarını en çok artıran değişkenler ekonomik büyüme ve fosil enerji tüketimi olurken, yenilenebilir enerji tüketimi ve kentleşme ise kişi başına karbon emisyonlarını azaltan önemli değişkenler olarak tespit edilmiştir. Kanada için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.12'de sunulmuştur.

Tablo 4.12. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Kanada

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0325	Pozitif
ln(YET)	-0.0181	Negatif
ln(FET)	0.929	Pozitif
ln(DT)	-0.0249	Negatif
ln(DYY)	0.028	Pozitif
ln(GSYİH)	0.2645	Pozitif
ln(KENT)	-0.3676	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9758
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0103
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0137
Görelî Mutlak Hata (RAE)		20.5829 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		21.1461 %

Tablo 4.12'ye göre, modelin yüksek korelasyon katsayısı (0.9758) ve düşük hata oranları (MAE: 0.0103, RMSE: 0.0137, RAE: %20.5829, RRSE: %21.1461) modelin başarılı bir tahmin performansına sahip olduğunu göstermektedir.

Kanada'da ln(FET), ln(GSYİH) ve ln(DYY) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla (0.929), (0.2645) ve (0.028) standart

sapmalık artışa neden olmaktadır. Sonuçlara göre, Kanada’da kişi başına karbon emisyonlarını en çok artıran değişken fosil enerji tüketimidir. 2023 yılı itibarıyla ülkede fosil yakıtların birincil enerji tüketimi içindeki payı %65,01’dir (Our World in Data, 2024f). Bu veri, analizde fosil enerji tüketiminin kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı etkisini desteklemektedir. Ekonomik büyüme de karbon emisyonlarını artıran ikinci önemli değişken olarak öne çıkmaktadır. Kanada’nın kişi başına GSYİH’sı 1991-2022 arasında %105 artarken, kişi başına CO₂ emisyonları %22 ve tüketim temelli CO₂ emisyonları %4 artmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu veriler ekonomik büyümenin emisyon artışına yol açtığını ve analiz sonucunu desteklediğini göstermektedir. Öte yandan, artış oranlarının görece düşük kalması, Kanada’nın üretim ve tüketimde daha az karbon yoğun bir yapıya yöneldiğine işaret etmektedir. Doğrudan yabancı yatırımların GSYİH’ye oranı 1991-2023 döneminde %0,57’den %2,23’e yükselmiştir (Our World in Data, 2024h). Ülkede doğrudan yabancı yatırımların önemli bir kısmı karbon yoğun sektörlerde (madencilik, kimya ve ilaç sanayileri vb.) yoğunlaşmaktadır. Özellikle enerji sektöründeki DYY’lerin %84’ünün fosil yakıtlara yönelmesi, ülke ekonomisinin karbon yoğunluğunu artırıcı bir etki yaratmaktadır (OECD, 2024a). Bu durum analiz sonucundaki DYY’nin kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı etkisini açıklamaktadır.

Diğer yandan ln(YET), ln(DT) ve ln(KENT) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)’de sırasıyla (-0.0181), (-0.0249) ve (-0.3676) standart sapmalık azalışa neden olmaktadır. Sonuçlara göre, Kanada’da kişi başına CO₂ emisyonlarını en fazla azaltan unsur kentleşmedir. Ülkede 2023 yılında kentleşme oranı %84,7’dir (Our World in Data, 2024i). Yüksek kentleşme oranı ile birlikte ülkede Federal Sürdürülebilir Kalkınma Stratejisi kapsamında sürdürülebilir şehirleşme politikaları (toplu ulaşım ve yeşil alan erişimine odaklanan Hedef 11 gibi) aktif şekilde uygulamaktadır (Government of Canada, 2025). Bu tür politikaların uygulanması, kentleşme sürecinde kişi başına CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayacağından analiz sonucu elde edilen kentleşmenin emisyonları azaltıcı etkisini desteklemektedir. Yenilenebilir enerji tüketimi de karbon emisyonlarını azaltıcı etkisi olan bir diğer değişkendir. 2023 yılında Kanada’da toplam elektrik üretiminin %66,50’si yenilenebilir kaynaklardan sağlanmıştır (Our World in Data, 2024l). Bu durum, ülkede yenilenebilir enerjiye yönelimin arttığını ve modelde belirlenen azaltıcı etkinin enerji politikalarındaki bu dönüşümle uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır.

Dış ticaretin de emisyonları azaltıcı etkisi bulunmaktadır. 1991-2022 döneminde Kanada'nın dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %7,2'den %-8,8'e düşerek %16'lık bir azalma göstermiştir (Our World in Data, 2024g). Ülkenin net karbon ithalatçısı konumdan net karbon ihracatçısı konumuna geldiği görülmektedir. Ülke yüksek karbon yoğun ürünleri (petrol, doğal gaz, kereste, madenler vb.) ihraç ederken görece düşük karbon yoğunluğuna sahip ürünleri (makine, elektronik, otomotiv, ilaç vb.) ithal etmektedir. Üretim sürecinde ortaya çıkan emisyon yükünün önemli bir kısmı ihracat ile yurt dışına çıkmakta, tüketim bazlı emisyonlar ise daha düşük karbon yoğunlu ürünler üzerinden gerçekleşmektedir. Kanada'nın enerji üretiminde ise hidroelektrik ve diğer yenilenebilir kaynakların yüksek payı, dış ticaretin emisyon azaltıcı etkisini güçlendirmektedir (MFA, t.y.-d). Bu durum analiz sonuundaki kısıtlı azaltıcı etkinin açıklaması niteliğindedir. Modelin sabiti olan sapma terimi (0.0325), tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen ln(CO₂) değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak, Kanada'da fosil enerji tüketimi karbon emisyonlarını en fazla artıran faktör olarak öne çıkarken, kentleşme ve yenilenebilir enerji tüketimi emisyonları azaltan en önemli değişkenler olarak belirlenmiştir. Küme 0 ülkeleri için SMOREg algoritması ile DVR sonuçları özet olarak Tablo 4.13'te sunulmuştur.

Tablo 4.13. SMOREg Algoritması ile DVR Sonuçları: Küme 0 Özet Tablosu

Ülke	ln(YET)	ln(FET)	ln(DT)	ln(DYY)	ln(GSYİH)	ln(KENT)
ABD	-0.234	0.7612	0.063	0.0289	-0.1783	0.1202
	<i>R: 0.996, MAE: 0.01, RMSE: 0.0123, RAE: 7.7859 %, RRSE: 8.7168 %</i>					
Avustralya	-0.6615	0.3447	-0.1017	-0.0183	0.5789	-0.2512
	<i>R: 0.9696, MAE: 0.0178, RMSE: 0.0212, RAE: 23.2687 %, RRSE: 23.6939 %</i>					
Kanada	-0.0181	0.929	-0.0249	0.028	0.2645	-0.3676
	<i>R: 0.9758, MAE: 0.0103, RMSE: 0.0137, RAE: 20.5829 %, RRSE: 21.1461 %</i>					

Tablo 4.13'e göre, Küme 0 ülkelerinde fosil enerji tüketiminin kişi başına CO₂ emisyonlarını en fazla artıran faktör olduğu görülmektedir. Buna karşılık, yenilenebilir enerji tüketimi üç ülkede de kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkiye sahip olup, en güçlü etki Avustralya'da (-0.6615) gözlemlenmiştir. ABD (-0.234) ve Kanada (-0.0181) için ise yenilenebilir enerji tüketiminin emisyonları azaltma etkisi daha sınırlıdır. Ekonomik büyüme değişkeni ise Kanada (0.2645) ve özellikle Avustralya'da

(0.5789) kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı yönde etkide bulunmaktadır. Buna karşılık ABD'de etkinin negatif yönde (-0.1783) olması dikkat çekicidir ve ekonomik faaliyetlerin daha az karbon yoğun sektörlerde gerçekleşmesiyle ilişkili olabilir.

Kentleşme Küme 0'daki ülkelerde genel olarak emisyonları azaltıcı önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır, özellikle Kanada (-0.3676) ve Avustralya (-0.2512) için kentleşmenin emisyonları düşürdüğü görülmektedir. Bu sonuç, şehirleşme süreçlerinin sürdürülebilir planlamayla yönetildiği ve düşük yoğunluklu kent yapısının karbon emisyonlarını azaltmada etkili olabileceğini düşündürmektedir. ABD'de ise kentleşmenin etkisi pozitif olup (0.1202), bu da kentsel nüfus artışının burada emisyon artışıyla daha fazla ilişkili olabileceğini göstermektedir. Dış ticaret ise kişi başına CO₂ emisyonlarını ABD için artırıcı (0.063), Kanada (-0.0249) ve Avustralya (-0.1017) için ise azaltıcı etkisi tespit edilmiştir. Doğrudan yabancı yatırımlar ise her üç ülkede de Kanada (0.028), ABD (0.0289) ve Avustralya'da (-0.0183) kişi başına CO₂ emisyonları üzerinde sınırlı bir etkiye sahiptir. Bu sonuç ise doğrudan yabancı yatırımların Küme 0'da karbon salımı açısından belirleyici bir faktör olmadığını göstermektedir.

Kısacası Küme 0'da yer alan RECAI ülkelerinde, genel olarak kişi başına CO₂ emisyonlarını en fazla artıran değişkenin fosil enerji tüketimi, azaltıcı değişken ise yenilenebilir enerji tüketimidir. Ayrıca ülkelerin ikisi için kentleşmenin de kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkisinin yüksek olduğunu söylemek mümkündür. Diğer değişkenlerin etkisi ise ülkelere göre sınırlı ve değişken sonuçlar sunmaktadır.

Küme 1 Ülkeleri için DVR Bulguları

X-Means algoritması kullanılarak gerçekleştirilen kümeleme analizi sonucunda Küme 1'de Birleşik Krallık, Almanya, Belçika, Danimarka, Finlandiya, Hollanda, İrlanda, İsrail, Japonya, Norveç, Güney Kore ve Güney Afrika ülkeleri tespit edilmiştir. Tablo 4.14'te Birleşik Krallık için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları sunulmuştur.

Tablo 4.14. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Birleşik Krallık

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0046	Pozitif
ln(YET)	0.0225	Pozitif
ln(FET)	0.969	Pozitif
ln(DT)	-0.0691	Negatif
ln(DYY)	-0.0267	Negatif
ln(GSYİH)	-0.0937	Negatif
ln(KENT)	0.077	Pozitif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9954
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.019
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0244
Görelî Mutlak Hata (RAE)		8.2804 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		9.2502 %

Tablo 4.14'e göre, modelin yüksek korelasyon katsayısı (0.9954) ve düşük hata oranları (MAE: 0.019, RMSE: 0.0244, RAE: %8.2804, RRSE: %9.2502), modelin başarılı bir tahmin performansına sahip olduğunu desteklemektedir.

Birleşik Krallık'ta ln(YET), ln(FET) ve ln(KENT) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla (0.0225), (0.969) ve (0.077) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Sonuçlara göre, Birleşik Krallık'ta kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimidir. 2023 yılı itibarıyla ülkede fosil yakıtların birincil enerji tüketimindeki payı %74,22'dir (Our World in Data, 2024f). Bu oran, analizde fosil enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki artırıcı etkisini açık biçimde desteklemektedir. Yenilenebilir enerji tüketiminin ise sınırlı düzeyde de olsa karbon emisyonlarını artırıcı etkide bulunduğu görülmektedir. Bu sonuç, özellikle biyoenerji ve hidroelektrik gibi bazı yenilenebilir kaynakların altyapı ve dönüşüm süreçlerinde yarattığı emisyonlarla açıklanabilir. Nitekim 2023 yılında Birleşik Krallık'ta en fazla elektrik üretimi rüzgâr enerjisinden (82,31 TWh) sağlanmış; bunu biyoenerji (33,99 TWh), güneş enerjisi (13,83 TWh) ve hidroelektrik (5,19 TWh) izlemiştir. Ayrıca ülkede yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam birincil enerji tüketimindeki payı 1991'de %0,61 iken 2023'te %20,52'ye yükselmiştir (Our World in Data, 2024j; Our World in Data, 2024m). Artış, analizde pozitif çıkan düşük katsayının geçici olabileceğini, rüzgâr ve güneş gibi sıfır emisyonlu kaynakların payı arttıkça, bu etkinin zamanla negatife döneceğini

göstermektedir. Birleşik Krallık'ta kentleşme oranı 2023 itibarıyla %89,4'tür (Our World in Data, 2024i). Yüksek kentsel nüfus özellikle enerji tüketimi, ulaşım ve altyapı ihtiyaçlarını da beraberinde getirir. Özellikle Birleşik Krallık'ta 2023 yılında ulaştırma sektörünün toplam emisyonları üzerindeki payı %29'dur (UK Government, 2025). Bu durum analiz sonucu elde edilen kentleşmenin sınırlı artırıcı etkisini açıklar niteliktedir.

Diğer yandan $\ln(DT)$, $\ln(DYY)$ ve $\ln(GSYİH)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.0691), (-0.0267) ve (-0.0937) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. Özellikle ekonomik büyümenin, karbon emisyonlarını azaltıcı yöndeki etkisi belirgin düzeydedir. Nitekim Birleşik Krallık'ta kişi başına GSYİH, 1991-2022 yılları arasında %84 artarken; kişi başına CO_2 emisyonları %49, tüketim temelli CO_2 emisyonları ise %28 oranında azalmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu veriler, analiz sonucuyla birlikte değerlendirildiğinde, ekonomik büyümenin çevreci politikalarla yönlendirilerek kişi başına karbon emisyonlarını azaltabildiğini göstermektedir. Dış ticaret (-0.0691) ve doğrudan yabancı yatırımların (-0.0267) CO_2 emisyonlarını azaltıcı yönde etkisi tespit edilmiştir. 1991-2023 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı %2,03'ten %-2.65'e düşmüştür (Our World in Data, 2024d). Düşüş, çevresel etkisi yüksek sektörlerle yapılan yatırımların azalmasıyla sonuçlanmış olabilir. Böylece, enerji ve emisyon yoğun üretim faaliyetlerinin sınırlandırılması, CO_2 emisyonlarını azaltıcı yönde etki yarattığı şeklinde açıklanabilir. Nitekim 2023 yılında Birleşik Krallık'a yapılan DYY'lerde en yüksek payı bilgi ve iletişim sektörünün alması bu durumu açıklar niteliktedir (Office for National Statistics [ONS], 2025). Birleşik Krallık'ta dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO_2 emisyonlarına oranı 1991'de %11,0 iken, 2022'de %55,7'ye yükselmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu artış, ülkenin karbon yoğun üretimi dışsallaştırarak ithalat yoluyla karşılamaya yöneldiğini göstermektedir. Model sonucundaki negatif dış ticaret katsayısı da bu yapının CO_2 emisyonlarını azaltıcı etkisini desteklemektedir. Son olarak, modelde yer alan sapma terimi (0.0046), tüm değişkenler standartlaştırılmış düzeydeyken tahmin edilen $\ln(CO_2)$ değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak Birleşik Krallık'ta kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran faktör fosil enerji tüketimi iken, ekonomik büyüme ve dış ticaret ise emisyonları azaltan en önemli değişkenlerdir. Bulgular, fosil enerji bağımlılığının azaltılması,

sürdürülebilir büyüme stratejilerinin genişletilmesi ve ticaret politikalarının düşük karbon ekonomisine uygun şekilde yönlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Almanya için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.15’te sunulmuştur.

Tablo 4.15. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Almanya

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.036	Negatif
ln(YET)	0.2231	Pozitif
ln(FET)	0.925	Pozitif
ln(DT)	0.0035	Pozitif
ln(DYY)	-0.0187	Negatif
ln(GSYİH)	-0.001	Negatif
ln(KENT)	-0.3085	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9797
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0198
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0262
Görelî Mutlak Hata (RAE)		20.1304 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		20.3544 %

Tablo 4.15’e göre, modelin korelasyon katsayısının (0.9797) oldukça yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu göstermektedir. Düşük hata oranları (MAE: 0.0198, RMSE: 0.0262, RAE: %20.1304, RRSE: %20.3544), modelin başarılı bir tahmin performansına sahip olduğunu desteklemektedir.

Almanya’da ln(FET), ln(DT) ve ln(YET) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, ln(CO₂)’de sırasıyla (0.925), (0.0035) ve (0.2231) standart sapmalılık artışa neden olmaktadır. Özellikle fosil enerji tüketimi, karbon emisyonlarını en fazla artıran faktör olarak öne çıkmaktadır. Almanya’da 2023 yılında fosil yakıtların birincil enerji tüketimindeki payı %75,04’tür (Our World in Data, 2024f). Bu oran, analiz sonucunu destekler niteliktedir çünkü yüksek fosil enerji kullanımı kişi başına CO₂ emisyonlarını artırmaktadır. Yenilenebilir enerji tüketiminin de artış yönlü etkiye sahip olması dikkat çekicidir. Almanya’da 2023 yılında en fazla elektrik üretimi rüzgâr enerjisinden (137,48 TWh) sağlanmış, ardından sırasıyla güneş enerjisi (61,22 TWh), biyoenerji ve diğer yenilenebilirler (46,10 TWh), son olarak hidroelektrik (19,89 TWh) gelmiştir. 1991 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam birincil enerji

tüketimindeki payı %1,27 iken, 2023 itibarıyla bu oran %24,39'a yükselmiştir (Our World in Data, 2024j; Our World in Data, 2024m). Ancak biyoenerji gibi bazı kaynakların dolaylı karbon etkileri, altyapı süreçlerinden kaynaklanan salımlar ve elektrik talebinin halen fosil enerjiyle karşılanması gibi nedenlerle, bu artış analizdeki pozitif etkiyi açıklar niteliktedir. Bu durum analiz sonucunu açıklar niteliktedir. Dış ticaretin CO₂ emisyonlarına çok sınırlı bir artış yönlü etkisi bulunmuştur. 1991-2022 arasında Almanya'nın dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %12,5'ten %24,0'a yükselmiştir (Our World in Data, 2024g). Ülke kara ulaşım araçları, makineler, nükleer reaktörler, kazanlar, elektrikli ürünler, eczacılık ürünleri, tekstil, giyim, meyve-sebze, haberleşme cihazları, metal mamuller, kauçuk ürünleri ve motor aksamaları ihraç etmektedir (MFA, t.y.- e). Bu açıdan, ülke net karbon ithalatçısı olmasına rağmen üretim sürecinde yüksek karbon salımına yol açan sanayi ürünleri, makineler, motor aksamaları ve enerji yoğun sektörlere ait ürünleri ihraç etmesi, analiz sonucu elde edilen dış ticaretin emisyonlar üzerindeki sınırlı artırıcı etkisini açıklamaktadır.

Öte yandan $\ln(DYY)$, $\ln(GSYİH)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.0187), (-0.001) ve (-0.3085) standart sapmalılık azalışa yol açmaktadır. Özellikle kentleşme, karbon emisyonlarını azaltıcı yönde en güçlü etkiye sahip değişkendir. 2023 yılında Almanya'da kentleşme oranı %78,6'dır (Our World in Data, 2024i). Ülkede enerji verimli kent altyapısı, sürdürülebilir ulaşım sistemleri ve şehirleşme politikaları yürütülmektedir. Freiburg'daki Vauban'daki pasif evler ve PlusEnergy yapıları ve Hamburg'daki HafenCity projesi Almanya'daki sürdürülebilir şehirleşmenin başarılı örnekleri arasındadır (Jablonski vd., 2025). Dolayısıyla ülkedeki bu çalışmalar, analiz sonucunda elde edilen kentleşme değişkeninin kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkisini desteklemektedir. Ekonomik büyümenin az da olsa emisyonları azaltıcı etkisi olduğu görülmektedir. Almanya'nın kişi başına GSYİH'si 1991-2022 döneminde %49 artarken, kişi başına CO₂ emisyonları %34 ve tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %27 azalmıştır (Our World in Data, 2024k). Emisyonlardaki azalış analizde belirlenen küçük çaplı azaltıcı etkinin, enerji verimliliği, düşük karbon teknolojileri ve sürdürülebilir kalkınma politikaları sayesinde sağlandığını göstermektedir ve analiz sonucunu destekler niteliktedir. Doğrudan yabancı yatırımların da CO₂ emisyonlarını sınırlı düzeyde azaltıcı etkisi olduğu tespit

edilmiştir. Almanya’da 1991-2023 yılları arasında DYY’nin GSYİH’ye oranı %0,25’ten %0,43’e yükselmiştir (Our World in Data, 2024h). Almanya’ya yapılan doğrudan yabancı yatırımlar en çok dijital, enerji sektörü, elektronik-otomasyon, mobilite-lojistik ile Ar-Ge sektörlerine yapılmaktadır (Germany Trade & Invest [GTAI], 2025). Ülkede DYY’lerin karbon yoğunluğu düşük ya da emisyon azaltıcı potansiyeli yüksek alanlara yönelmesi analiz sonucu elde edilen DYY’nin kişi başına CO₂ emisyonları üzerindeki azaltıcı etkisini desteklemektedir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.036), tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu durumda tahmin edilen ln(CO₂) değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak Almanya’da fosil enerji tüketimi kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olurken, kentleşme ise emisyonları azaltıcı etki yapan en önemli değişkendir. Bulgular sürdürülebilir şehirleşme, düşük karbonlu ulaşım sistemleri ve fosil enerji bağımlılığının azaltılmasına yönelik politikaların Almanya’da karbon emisyonlarını kontrol altına almak açısından kritik rol oynadığını göstermektedir. Belçika için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.16’da sunulmuştur.

Tablo 4.16. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Belçika

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.007	Pozitif
ln(YET)	- 0.0679	Negatif
ln(FET)	0.5938	Pozitif
ln(DT)	0.062	Pozitif
ln(DYY)	0.0386	Pozitif
ln(GSYİH)	-0.4657	Negatif
ln(KENT)	-0.0651	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.994
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0129
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0178
Görelî Mutlak Hata (RAE)		8.6289 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		10.6751 %

Tablo 4.16’ya göre, modelin korelasyon katsayısının (0.994) oldukça yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu

göstermektedir. Düşük hata oranları (MAE: 0.0129, RMSE: 0.0178, RAE: %8.6289, RRSE: %10.6751), modelin başarılı bir tahmin performansına sahip olduğunu desteklemektedir.

Belçika’da $\ln(\text{FET})$, $\ln(\text{DT})$ ve $\ln(\text{DYY})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ ’de sırasıyla (0.5938), (0.062) ve (0.0386) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Özellikle fosil enerji tüketimi, kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olarak öne çıkmaktadır. 2023 yılında Belçika’da fosil yakıtların birincil enerji tüketimindeki payı %74,69’dur (Our World in Data, 2024f). Bu oran, analizde belirlenen fosil enerji tüketiminin kişi başına CO_2 emisyonlarını artırıcı etkisini destekler niteliktedir. Ülkenin enerji üretiminde hâlâ fosil yakıtlara önemli ölçüde bağımlı olduğu anlaşılmaktadır. Dış ticaret ve doğrudan yabancı yatırımlar da CO_2 emisyonlarını artıran diğer faktörler olarak öne çıkmaktadır. 1991-2022 yılları arasında Belçika’nın dış ticaret yoluyla net ithal ettiği gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO_2 emisyonlarına oranı %26,1’den %127’ye yükselerek %100,9’luk bir artış göstermiştir (Our World in Data, 2024g). Bu ciddi artış, ülkenin tükettiği ürünlerin büyük bölümünü dış kaynaklardan temin ettiğini ve bu yolla üretimden kaynaklanan karbon emisyonlarının önemli bir kısmını başka ülkelere aktardığını göstermektedir. Analiz sonucunda ise DT kısıtlıda olsa emisyonlar üzerinde artırıcı etkiye sahip bulunmuştur. MFA (t.y.- f)’ye göre ülke; otomobil, steysin vagonlar, yarış arabaları, ilaçlar, petrol yağları ve bitümenli minerallerden elde edilen yağlar; elmaslar, plastik mamuller, demir cevherleri, karayolu taşıtları demir çelik ürünleri gibi ürünleri ihraç etmektedir. Bu açıdan net karbon ithalatçısı olmasına rağmen üretiminde yüksek enerji ve karbon yoğunluğu barındıran sanayi ürünleri ile hammadde işleme faaliyetlerine dayalı ihracatı, ülkenin analizi sonucu elde edilen DT’nin emisyonlar üzerindeki sınırlı artırıcı etkisini açıklar niteliktedir. 1991-2023 döneminde doğrudan yabancı yatırımların GSYİH’ye oranı %2,98’den %-0,43’e düşerek %3,41’lik bir azalma göstermiştir (Our World in Data, 2024h). DYY’nin azalması, sürdürülebilir yatırımların da zayıfladığını düşündürebilir ve analizde gözlenen sınırlı artırıcı etkinin nedeni olabilir. Bu durum analiz sonucunu açıklar niteliktedir ve Belçika’nın dışa açıklığının çevresel sürdürülebilirlik açısından olumsuz bir yöne evrildiğine işaret etmektedir. Özellikle Belçika’da 1 Temmuz 2023-30 Haziran 2024 dönemine ait rapora göre, DYY’nin en çok yoğunlaştığı sektörler; veri (%15,1), sağlık (%15,1), dijital altyapı (%11,6), ulaştırma (%10,5) ve elektronik

iletişim (%8,1)'dir (White & Case, 2025). Bu durum ÷lkede yatırımların yüksek teknoloji ve hizmet odaklı olduğunu; karbon azaltım potansiyeli açısından sınırlı alanlarda yoğunlaştığını göstermektedir.

Öte yandan $\ln(YET)$, $\ln(GSYİH)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.0679), (-0.4657) ve (-0.0651) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. 2023 yılında ÷lkede toplam elektrik üretiminin %33,4'ü yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmışır (Our World in Data, 2024l). Bu oran, yenilenebilir enerji tüketiminin kişi başına CO_2 emisyonlarını azaltıcı etkisini destekler niteliktedir. Ayrıca ekonomik büyümenin de karbon emisyonlarını azaltıcı yönde etkili olduğu gör÷lmektedir. Belçika'da 1991-2022 yılları arasında kişi başına GSYİH %73 artarken, kişi başına CO_2 emisyonları %28 azalmış, ancak tüketim temelli kişi başına CO_2 emisyonları %30 artmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu veriler, analiz sonucunda ekonomik büyümenin CO_2 emisyonlarını azaltıcı etkisinin desteklendiğini gösterirken, üretimden ziyade tüketim kaynaklı emisyonların arttığını ve emisyon yük÷n÷n kısmen dışa taşındığını da ortaya koymaktadır. Ayrıca model sonucunu hem destekler hem de açıklar niteliktedir. Kentleşmenin karbon emisyonlarını azaltıcı yönde etkili olduğu gör÷lmektedir. 2023 yılı itibarıyla Belçika'da kentleşme oranı %97,7'dir (Our World in Data, 2024i). Kentleşmede gör÷len yüksek oran, analizde belirlenen azaltıcı etkinin, sürdür÷lebilir şehirleşme uygulamaları, toplu taşıma sistemleri ve enerji verimliliği yüksek kentsel altyapılarla desteklendiğini göstermektedir. Belçika'nın 30 Nisan 2021'de Avrupa Komisyonu'na sunduğu 140 projeden oluşan Ulusal İyileşme ve Dayanıklılık Planı'nda; yeşil otob÷sler, elektrikli şarj istasyonları, bisiklet yolları, evler ve kamu binalarının enerji renovasyonu, hidrojen üretimi ve taşınması, Kuzey Denizi'nde rüzėâr enerjisiyle bağlantılı enerji merkezi kurulması, biyolojik çeşitliliğin korunması ve sürdür÷lebilir su yönetimi gibi sürdür÷lebilir şehirleşme politikalarına yer verilmesi bu sonucu desteklemektedir (Pecinovsky, 2022: 3). Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (0.007), tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu durumda tahmin edilen $\ln(CO_2)$ değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak fosil enerji tüketimi Belçika'da kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran faktör olarak öne çıkarken, ekonomik büyüme ise emisyonları azaltan en önemli değişken olarak belirlenmiştir. Danimarka için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.17'de sunulmuştur.

Tablo 4.17. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Danimarka

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0116	Negatif
ln(YET)	-0.151	Negatif
ln(FET)	0.8591	Pozitif
ln(DT)	0.0139	Pozitif
ln(DYY)	-0.0332	Negatif
ln(GSYİH)	0.0259	Pozitif
ln(KENT)	-0.0527	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.995
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0271
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0332
Görelî Mutlak Hata (RAE)		8.9397 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		9.7452 %

Tablo 4.17'ye göre, modelin korelasyon katsayısı (0.995), MAE: 0.0271, RMSE: 0.0332, RAE: %8.9397, RRSE: %9.7452), modelin başarılı bir tahmin performansına sahip olduğunu desteklemektedir.

Danimarka'da ln(FET), ln(DT) ve ln(GSYİH) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla (0.8683), (0.0139) ve (0.0259) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Özellikle fosil enerji tüketimi, kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olarak öne çıkmaktadır. 2023 yılında Danimarka'da fosil yakıtların birincil enerji tüketimindeki payı %57,27'dir (Our World in Data, 2024f). Bu oran, analizde elde edilen fosil enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını artırıcı etkisini destekler niteliktedir. Danimarka'da enerji üretiminde hâlâ fosil kaynakların belirli ölçüde kullanılması, kişi başına CO₂ emisyonunu artıran bir faktör olmaya devam etmektedir. Dış ticaret de analizde karbon emisyonlarını artırıcı yönde ancak sınırlı düzeyde etkili bir değişken olarak belirlenmiştir. 1991-2022 yılları arasında Danimarka'nın dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %2,6'dan %59,7'ye çıkarak %57,1'lik bir artış göstermiştir (Our World in Data, 2024g). Bu artış, emisyon yükünün giderek daha fazla ithal ürünler üzerinden başka ülkelere taşındığını ülkenin net gömülü karbon ithalatçısı olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte 1991-2022 yılları arasında Danimarka'nın üretim bazlı emisyonları %56, tüketim bazlı emisyonları ise %31 azalmıştır (Our World in Data, 2024p). Bu durumda Danimarka'nın dış

ticaretinin üretim bazlı emisyonların önemli ölçüde azalmasını sağlarken, ithalat yoluyla tüketim bazlı emisyonlarının daha sınırlı düşmesine neden olduğunu söylemek mümkündür. Dış ticaretin, CO₂ emisyonları açısından net artırıcı bir etki yarattığı ve bu durumun analiz sonucuyla örtüştüğü görülmektedir. Ekonomik büyüme değişkeni ise analizde CO₂ emisyonlarını artırıcı yönde sınırlı bir etkiye sahiptir. Danimarka’da kişi başına GSYİH 1991-2022 yılları arasında %73 artarken, kişi başına CO₂ emisyonları %56 ve tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %31 oranında azalmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu durum, ekonomik büyümenin çevreci politikalarla desteklendiğini ve genel olarak emisyonların azaldığını göstermektedir. Analizde gözlemlenen sınırlı artırıcı etki, tüm dönem ortalaması dikkate alınarak hesaplanan regresyon sonucunun, bazı yıllardaki geçici etkileri de içerdiğini düşündürmekte ve analiz sonucu elde edilen eğilimi açıklar niteliktedir.

Öte yandan ln(YET), ln(DYY) ve ln(KENT) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)’de sırasıyla (-0.151), (-0.0332) ve (-0.0527) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji tüketimi, CO₂ emisyonlarını azaltan en önemli değişkenlerden biridir. 2023 yılında Danimarka’da toplam elektrik üretiminin %87’si yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmıştır (Our World in Data, 2024l). Bu oran, analiz sonucunda elde edilen azaltıcı etkinin güçlü bir şekilde desteklendiğini göstermektedir ve Danimarka’nın enerji dönüşümünün karbon emisyonlarını azaltma yönündeki etkisini doğrulamaktadır. Doğrudan yabancı yatırımlar da CO₂ emisyonlarını azaltıcı yönde etki göstermektedir. 1991-2022 yılları arasında DYY’nin GSYİH’ye oranı %1,12’den %7,67’ye çıkarak %6,55’lik artış göstermiştir (Our World in Data, 2024h). Danimarka’ya gelen doğrudan yabancı yatırımlar ağırlıklı olarak temiz teknolojiye yönelmekte; ayrıca gıda, denizcilik, tasarım ve inovasyon gibi sürdürülebilir ve düşük karbonlu sektörlere odaklanmaktadır (U.S. Department of State, 2024). Bu durum analiz sonucu elde edilen DYY değişkeninin azaltıcı etkisini açıklar niteliktedir. Ülkede kentleşme oranı 2023 yılında %89,3’tür (Our World in Data, 2024i). Ülkenin başkenti, Avrupa’nın beşinci yeşil başkenti olan Kopenhag’dır ve bisiklet şehri olması ile birlikte gelişmiş toplu taşıma imkanlarına sahiptir (Cömertler, 2017: 50; Irmak ve Avcı, 2019: 8). Ülkenin bu özellikleri analiz sonucu bulunan kentleşmenin kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı yönde etkili olduğu bulgusunu destekler niteliktedir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.0116), tüm bağımsız değişkenlerin

standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda tahmin edilen $\ln(\text{CO}_2)$ değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak Danimarka’da fosil enerji tüketimi karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olurken, yenilenebilir enerji tüketimi ve kentleşme emisyonları azaltan en önemli faktörler olarak öne çıkmaktadır. Finlandiya için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.18’de sunulmuştur.

Tablo 4.18. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Finlandiya

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0142	Negatif
$\ln(\text{YET})$	0.0086	Pozitif
$\ln(\text{FET})$	1.0928	Pozitif
$\ln(\text{DT})$	-0.0179	Negatif
$\ln(\text{DYY})$	-0.0209	Negatif
$\ln(\text{GSYİH})$	0.0422	Pozitif
$\ln(\text{KENT})$	0.0957	Pozitif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9951
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0178
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.022
Görelî Mutlak Hata (RAE)		9.3648 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		9.6129 %

Tablo 4.18’e göre, modelin performans ölçütleri olan korelasyon katsayısı: 0.9951, MAE: 0.0178, RMSE: 0.022, RAE: %9.3648 ve RRSE: %9.6129 olması modelin başarılı bir tahmin performansına sahip olduğunu desteklemektedir.

Finlandiya’da $\ln(\text{FET})$, $\ln(\text{GSYİH})$, $\ln(\text{KENT})$ ve $\ln(\text{YET})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ ’de sırasıyla (1.0928), (0.0422), (0.0957) ve (0.0086) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Özellikle fosil enerji tüketimi, kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olarak öne çıkmaktadır. 2023 yılında Finlandiya’da fosil yakıt tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %38,36’dır (Our World in Data, 2024f). %38,36’lık oran, analizde elde edilen fosil enerji tüketiminin CO_2 emisyonlarını artırıcı etkisini destekler nitelikte ve ülkede fosil yakıt kullanımının halen enerji sisteminde önemli bir yer tuttuğunu göstermektedir. Ekonomik büyüme değişkeni de analizde CO_2 emisyonlarını artırıcı yönde etki göstermektedir. Oysa Finlandiya’da kişi başına

GSYİH 1991-2022 yılları arasında %75 oranında artarken, kişi başına CO₂ emisyonları %34 ve tüketim temelli emisyonlar %33 oranında azalmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu durum, uzun dönemde uygulanan düşük karbonlu büyüme stratejileri sayesinde fiili emisyonların azaltıldığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, analizde elde edilen sınırlı artırıcı etki, belirli dönemlerdeki kısa vadeli dalgalanmaları yansıtmakta olup; bu çerçevede ilgili sonuç, dönem ortalaması etkisini açıklayan bir bulgu niteliğindedir. Finlandiya’da kentleşme oranı 2023 yılı itibarıyla %87,8’dir (Our World in Data, 2024i). Ülkede 2018-2024 yılları arasında bisiklet kullanımının azalmasına bağlı olarak araç kullanımının artış gösterirken, Covid-19’un etkisiyle ise toplu taşıma kullanımına olan talep düşüş göstermiştir (Tiikkaja ve Viri, 2021; Orta, 2025). Ayrıca Finlandiya’da bina ısıtmasından kaynaklı CO₂ emisyonlarında meydana gelmektedir (Hirvonen ve Kosonen, 2020). Analiz sonucunda kentleşmenin kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı yöndeki etkisi artan bireysel araç kullanımı, sürdürülebilir ulaşım biçimlerine olan talebin azalması ve ısınma ihtiyacından kaynaklı olabilir. Finlandiya’da yenilenebilir enerji tüketimi, modelde kişi başına CO₂ emisyonlarını sınırlı düzeyde artırıcı yönde etki etmektedir. Bu durum, ilk bakışta beklenmeyen bir sonuç gibi görünse de ülkenin enerji dönüşüm sürecinin hâlen devam ettiği dikkate alındığında, bu bulgu açıklanabilir hale gelmektedir. 2023 yılında yenilenebilir enerjinin toplam birincil enerji tüketimindeki payı %35,94 ve toplam elektrik üretimindeki payı %51,8’dir (Our World in Data, 2024j; Our World in Data, 2024l; Our World in Data, 2024m). Bu oranlar, Finlandiya’nın enerji dönüşümünde önemli bir mesafe katettiğini desteklemektedir. Ancak biyoenerji gibi bazı yenilenebilir kaynakların üretim süreçlerinde karbon salımı yaratabilmesi ve enerji talebinin artması, yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını azaltıcı yönde değil, geçici olarak artırıcı yönde etki göstermesine neden olduğu düşünülmektedir.

Öte yandan $\ln(DT)$ ve $\ln(DYY)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(CO_2)$ ’de sırasıyla (-0.0179) ve (-0.0209) standart sapmalık azalışa neden olmaktadır. 1991-2022 yılları arasında dış ticaret yoluyla net ithal edilen gömülü karbon emisyonlarının toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %35,1’den %37,5’e yükselmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu durum ülkenin net karbon ithalatçısı olduğunu ve ithalatın üretim kaynaklı emisyonları dışsallaştırmasından dolayı, analiz sonucu elde edilen dış ticaretin azaltıcı etkisini desteklemektedir. Doğrudan yabancı yatırımlar ise modelde emisyonları azaltıcı yönde

etkili olmuştur. 1991-2022 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı %-0,18'den %4,67'ye yükselmiştir (Our World in Data, 2024h). Artışla birlikte elde edilen analiz sonucu, ülkeye yönelen yatırımların büyük ölçüde çevre dostu, düşük karbon teknolojilerine dayalı sektörlerde yoğunlaştığını ve sürdürülebilir üretim yapısına katkı sunduğunu destekler niteliktedir. Nitekim 2020-2023 döneminde Finlandiya'ya gelen doğrudan yabancı yatırımların önemli bir kısmının profesyonel hizmetler, bilgi ve iletişim teknolojileri ile birlikte biyodöngü ve temiz teknoloji, sağlık ve refah sektörlerinde gerçekleşmiş olması bu durumu desteklemektedir (Polo, 2024). Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.0142), tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen $\ln(\text{CO}_2)$ değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak, Finlandiya'da fosil enerji tüketimi karbon emisyonlarını en fazla artıran değişkendir. Doğrudan yabancı yatırımlar ve dış ticaret ise emisyonları azaltan faktörler olarak öne çıkmaktadır. Hollanda için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.19'da sunulmuştur.

Tablo 4.19. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Hollanda

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0106	Negatif
$\ln(\text{YET})$	-0.6521	Negatif
$\ln(\text{FET})$	0.6316	Pozitif
$\ln(\text{DT})$	-0.0393	Negatif
$\ln(\text{DYY})$	-0.0426	Negatif
$\ln(\text{GSYİH})$	0.1264	Pozitif
$\ln(\text{KENT})$	0.1665	Pozitif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9877
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0148
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.021
Görelî Mutlak Hata (RAE)		14.2978 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		15.5982 %

Tablo 4.19'a göre, modelin korelasyon katsayısının (0.9877) oldukça yüksek olması ve düşük hata oranları (MAE: 0.0148, RMSE: 0.021, RAE: %14.2978, RRSE: %15.5982) modelin başarılı bir tahmin performansına sahip olduğunu göstermektedir.

Hollanda’da $\ln(\text{FET})$, $\ln(\text{GSYİH})$ ve $\ln(\text{KENT})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ ’de sırasıyla (0.6316), (0.1264) ve (0.1665) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Özellikle fosil enerji tüketimi, kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olarak öne çıkmaktadır. 2023 yılında Hollanda’da fosil yakıt tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %81,17’dir (Our World in Data, 2024f). Bu oran, analiz sonucunda elde edilen fosil enerji kaynaklarının emisyonları artırıcı etkisini destekler niteliktedir ve ülkenin hâlen fosil yakıtlara yüksek oranda bağımlı olduğunu göstermektedir. Ekonomik büyüme ve kentleşme de CO_2 emisyonlarını artırıcı faktörler olarak öne çıkmaktadır. 1991-2022 yılları arasında kişi başına GSYİH %91 oranında artarken, kişi başına CO_2 emisyonları %26 ve tüketim temelli kişi başına CO_2 emisyonları %25 oranında azalmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu veriler, ekonomik büyümenin modelde artış yönünde etkili olmasına rağmen, fiilen emisyonların azalmış olmasının, büyümenin enerji verimliliği ve temiz teknolojilerle desteklendiğini göstermektedir. Dolayısıyla analiz sonucu, büyümenin emisyonları artırıcı potansiyelini açıklamakta fakat bu potansiyelin uygulamada sınırlanabildiğini de ortaya koymaktadır. Ülkede kentleşme oranı 2023 yılı itibarıyla %86,2’dir (Our World in Data, 2024i). Yüksek kentleşme oranı enerji talebi, ulaşım ve altyapı baskısı oluşturur. Bu açıdan ülkenin özellikle Covid-19 sonrasında ulaşım yapısı aksaklıklara uğramıştır. 2019-2022 yılları arasında tren kullanımında %22, otobüs, tramvay ve metro kullanımında ise %31 oranında azalış görülürken, toplu taşımayı kullanmayanların oranı %45’ten %55’e kadar yükselmiştir (De Haas, 2023). Son yıllarda yaşanan bu ulaşım sıkıntısından dolayı ise bireysel araç kullanımına bağlı olarak şehirlerde kişi başına CO_2 emisyonlarında artış yaşanması, analiz sonucundaki kentleşmenin emisyonları artırıcı etkisini açıklar niteliktedir.

Öte yandan $\ln(\text{YET})$, $\ln(\text{DT})$ ve $\ln(\text{DYY})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ ’de sırasıyla (-0.6521), (-0.0393) ve (-0.0426) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji tüketimi, CO_2 emisyonlarını en fazla azaltan değişken olarak öne çıkmaktadır. 2023 yılında Hollanda’da yenilenebilir enerjinin birincil enerji tüketimindeki payı %17,79, elektrik üretimindeki payı ise %47,30’dur (Our World in Data, 2024j; Our World in Data, 2024l). Bu oranlar, enerji sisteminde dönüşümün hızlandığını desteklemekte ve analiz sonucunda elde edilen emisyon azaltıcı etkiyi doğrular niteliktedir. Buna karşın, birincil enerji tüketimindeki yenilenebilir enerji payının hâlâ %20’nin altında kalması,

fosil yakıtların sistemdeki baskın rolünü sürdürdüğünü ve bu nedenle CO₂ emisyonlarının hâlen yüksek seviyelerde seyrettiğini açıklamaktadır. 1991-2022 yılları arasında Hollanda'nın dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %22,5'ten %23,9'a yükselmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu durum ülkenin net karbon ithalatçısı konumunun arttığını ve ithalatın üretim kaynaklı emisyonları dışsallaştırmasından dolayı, analiz sonucu elde edilen dış ticaretin azaltıcı etkisini desteklemektedir. 1991-2022 yılları arasında doğrudan yabancı yatırımların GSYİH'ye oranı %1,71'den %1,49'a gerilemiştir (Our World in Data, 2024h). Analiz sonucunda elde edilen DYY'nin emisyonlar üzerindeki kısıtlı azaltıcı etkisi, DYY meydana gelen azalışın ülkede karbon yoğun üretim gerçekleştiren sektörlerdeki yatırımların azaldığının göstergesi niteliğindedir. Nitekim 2022'de Hollanda'daki doğrudan yabancı yatırımlar (DYY) en çok toptan ve perakende ticaret, iş hizmetleri, imalat, bilgi ve iletişim sektörlerinde yoğunlaşması bu duruma örnek niteliğindedir (Centraal Bureau voor de Statistiek, 2024). Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.0106), tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen $\ln(\text{CO}_2)$ değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak, Hollanda'da fosil enerji tüketimi kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olurken, yenilenebilir enerji tüketimi emisyonları azaltan en önemli faktör olarak öne çıkmaktadır. İrlanda için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.20'de sunulmuştur.

Tablo 4.20. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: İrlanda

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0044	Pozitif
ln(YET)	-0.0099	Negatif
ln(FET)	0.8268	Pozitif
ln(DT)	-0.0949	Negatif
ln(DYY)	0.0865	Pozitif
ln(GSYİH)	0.0236	Pozitif
ln(KENT)	-0.2078	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9956
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0138
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0169
Görelî Mutlak Hata (RAE)		8.4207 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		8.8827 %

Tablo 4.20'ye göre, modelin korelasyon katsayısının (0.9956) ve düşük hata oranlarının (MAE: 0.0138, RMSE: 0.0169, RAE: %8.4207, RRSE: %8.8827) olması modelin başarılı bir tahmin performansına sahip olduğunu belirtmektedir.

İrlanda'da ln(FET), ln(DYY) ve ln(GSYİH) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla (0.8268), (0.0865) ve (0.0236) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Özellikle fosil enerji tüketimi, kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olarak öne çıkmaktadır. İrlanda'nın 2023 yılında toplam fosil yakıt tüketimi 140,45 TWh; fosil yakıt tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı ise %77,70'tir (Our World in Data, 2024f; Our World in Data, 2024n). Bu değer ve analiz sonucu birlikte değerlendirildiğinde, ülkenin enerji üretiminde hâlâ fosil kaynaklara önemli ölçüde bağımlı olduğu ve bu durumun kişi başına emisyonları artırıcı etkide bulunduğu anlaşılmaktadır. Ekonomik büyüme de CO₂ emisyonlarını artıran bir diğer değişkendir. Ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %512 oranında artarken, kişi başına CO₂ emisyonları %9 ve tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %15 oranında artmıştır (Our World in Data, 2024k). Oranlar, büyümeye oranla çok az miktarda CO₂ emisyonlarında artış görüldüğünü; ekonominin zamanla daha az karbon yoğun çalışmaya başladığını göstermekte ve sınırlı artırıcı etkinin bundan kaynaklı olabileceğini vurgulamaktadır. Doğrudan yabancı yatırımların da emisyonları artırıcı etkisi bulunmaktadır. Ülkede 1991-2022 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı %0,39'dan %-6,49'a düşerek,

%6,88'lik bir azalış göstermiştir (Our World in Data, 2024h). Analiz sonucu bu geçmiş yatırım eğilimlerinin kişi başına CO₂ emisyonlarını artırdığını göstermekte, ancak güncel verilere bakıldığında DYY'deki düşüşün bu baskıyı son yıllarda azalttığı söylenebilmektedir. Nitekim ülkede 1986 ile 1998 tarihleri arasında yapılan doğrudan yabancı yatırımların metal, petrol, kimyasal ve tekstil üretimi endüstrileri gibi karbon yoğun sektörler olması nedeniyle karbon salınımını artırıcı neden olması bu durumu açıklar nitektedir (O'Mahony ve Barry 2005).

Öte yandan $\ln(YET)$, $\ln(DT)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.0099), (-0.0949) ve (-0.2078) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. Yenilenebilir enerji tüketiminin emisyonları azaltıcı etkisinin düşük düzeyde kalması, dönüşüm sürecinin henüz emisyonları baskılayacak düzeye erişmediğini göstermektedir. Nitekim ülkenin toplam elektrik üretiminin %45'i yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmiştir (Our World in Data, 2024i). Oran, analiz sonucundaki zayıf azaltıcı etkiyle tutarlılık göstermektedir. Dış ticaretin CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkisi ise gömülü karbon emisyonlarının yurtdışına aktarılmasından kaynaklanabilir. Nitekim 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %22,5'ten %29,2'ye yükselmiştir (Our World in Data, 2025g). Bu artış, ülkenin net karbon ithalatçısı konumunu pekiştirmekte ve teorik olarak emisyon azaltıcı bir etkiyle tutarlılık göstermektedir. Ülkede 2023 yılında kentleşme oranı %68,7'dir (Our World in Data, 2024i). Bu oran ve analiz sonucu birlikte değerlendirildiğinde, sürdürülebilir şehirleşme politikalarının kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı bir etki yarattığı ve bu etkinin model tarafından da desteklendiği görülmektedir. Nitekim 2019 yılından bu yana İrlanda hükümetinin evlerin enerji tüketimini ve CO₂ emisyonlarını azaltmak için yalıtım, ısı pompası kurulumu, güneş paneli entegrasyonu gibi enerji güncellemeleri için 186.000 ev modernize edilmiştir (Government of Ireland, 2025). Ülkedeki bu gibi sürdürülebilir şehirleşme çalışmaları ise analiz sonucunda elde edilen kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı sonucunu doğrulamaktadır. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (0.0044), tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen $\ln(CO_2)$ değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak İrlanda'da fosil enerji tüketimi kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olurken, kentleşmenin ise emisyonları azaltan en önemli faktör

olduğu görülmektedir. İsrail için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.21’de sunulmuştur.

Tablo 4.21. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: İsrail

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0781	Pozitif
ln(YET)	-0.2918	Negatif
ln(FET)	0.4113	Pozitif
ln(DT)	0.4303	Pozitif
ln(DYY)	-0.1532	Negatif
ln(GSYİH)	0.1522	Pozitif
ln(KENT)	-0.0688	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.876
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0548
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0625
Görelî Mutlak Hata (RAE)		48.8495 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		47.6323 %

Tablo 4.21’e göre, modelin MAE (0.0548) ve RMSE (0.0625) değerleri, hata oranlarının kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. RAE (%48.8495) ve RRSE (%47.6323) değerleri ise nispeten yüksek olsa da korelasyon katsayısının 0.876 olması, modelin karbon emisyonlarını açıklamada belirli bir başarı sağladığını göstermektedir. Genel olarak model, İsrail’e yönelik anlamlı sonuçlar sunmaktadır.

İsrail’de ln(FET), ln(DT) ve ln(GSYİH) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, ln(CO₂)’de sırasıyla (0.4113), (0.4303) ve (0.1522) standart sapmalılık artışa neden olmaktadır. Fosil enerji tüketimi ve dış ticaret, kişi başına karbon emisyonlarını artırıcı yönde en yüksek etkiye sahip iki değişken olarak öne çıkmaktadır. 2023 yılında ülkede fosil yakıt tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %92,93; toplam fosil yakıt tüketimi 287,59 TWh ve elektrik üretiminin %89,5’i fosil yakıtlardan sağlanmaktadır (Our World in Data, 2024f; Our World in Data, 2024n; Our World in Data, 2024o). Bu oranlar, analiz sonucuyla tutarlılık göstermekte ve enerji arzında hâlen karbon yoğun kaynakların belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Ekonomik büyüme de kişi başına CO₂ emisyonlarını artıran bir değişken olarak belirlenmiştir. Ancak analiz sonuçlarına göre etkisi, fosil enerji tüketimi ve dış ticarete göre daha sınırlı düzeydedir. Ülkenin kişi başına

GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %265 oranında artarken, kişi başına CO₂ emisyonları %69 ve tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %67 oranında artmıştır (Our World in Data, 2024k). Oranlar büyümeyle beraber CO₂ emisyonlarında artış yaşandığını göstermekte ve analiz sonuçlarını desteklemektedir. 1991-2022 döneminde gömülü karbon emisyonlarının üretim temelli emisyonlara oranı %38,2'den %37,4'e gerilemesi, ülkenin net karbon ithalatçısı konumunda olduğu ama bu durumun azaldığını göstermektedir. Buna karşın dış ticaret yapısında enerji, demir-çelik ve motorlu taşıtlar gibi karbon yoğun ürünlerin ithalatı, ülkenin emisyonlar üzerinde artırıcı bir baskı oluşturmayı sürdürmesine yol açmaktadır (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2024). Bu durum ise analiz sonucu elde edilen dış ticaretin kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı etkisine örnek teşkil etmektedir.

Öte yandan $\ln(YET)$, $\ln(DYY)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.2918), (-0.1532) ve (-0.0688) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. Yenilenebilir enerji tüketiminin kişi başına karbon emisyonlarını azaltıcı etkisi dikkat çekmektedir. 2023 yılında yenilenebilir enerjinin birincil enerji tüketimindeki payı %7,07'dir (Our World in Data, 2024j). Bu oran görece düşük olmakla birlikte, analizde ortaya çıkan belirgin azaltıcı etki, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanımına işaret etmektedir. Bu durum, analiz sonucunu desteklemekte ve enerji dönüşüm sürecinin çevresel etkiler üzerindeki olumlu katkısını göstermektedir. Kentleşme oranı 2023 yılında %58,3'tür (Our World in Data, 2024i). Bu görece düşük orana rağmen analizde kentleşmenin CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkisi saptanmıştır. Bu sonuç, kentsel alanlardaki çevreye duyarlı altyapı politikalarının etkili olduğu ve enerji verimliliğinin arttığına işaret etmektedir. Nitekim İsrail'de toplu taşımaya yönelik yoğun yatırımlar yapılmakta olup, bu projeler iklimle mücadele kapsamında değerlendirildiğinden 'yeşil yaprak projeleri' olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca ülkede evsel ve kentsel atıkların gömülmesini azaltmak amacıyla yakma teknolojisi kullanılmakta, elde edilen enerji geri kazanılmaktadır (Government of Israel, 2025). Bu durum kentleşmenin analiz sonucundaki kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkisine örnek teşkil etmektedir. Doğrudan yabancı yatırımların da kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkisi belirlenmiştir. 1991-2022 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı %0,49'dan %4,39'a yükselmiştir (Our World in Data, 2024h). Bu artış ile birlikte analiz sonucunda elde edilen negatif etki birlikte değerlendirildiğinde, İsrail'de doğrudan

yabancı yatırımların çevreci sektörler'e yönelmiş olduğu ve emisyonları azaltıcı katkı sunduğu anlaşılmaktadır. Nitekim İsrail'de DYY en çok yarı iletkenler (çip ve mikroişlemci üretimi), bilgi teknolojileri (yazılım, BT hizmetleri, start-uplar), yaşam bilimleri (biyoteknoloji, tıbbi cihazlar), imalat (özellikle bilgisayar ve elektronik ekipmanlar), bilgi ve iletişim, mesleki-bilimsel-teknik faaliyetler (Ar-Ge, mühendislik, danışmanlık) ile finans ve sigorta (bankacılık, fintech, sigortacılık) alanlarına yapılmaktadır (Lloyds Bank Trade, 2025a). Bu sektörler, ağır sanayiye kıyasla görece düşük karbon yoğunluklu olduğundan, DYY'nin İsrail'de kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı yönde etkisini açıklar niteliktedir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (0.0781), tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen ln(CO₂) değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak dış ticaret, fosil enerji tüketimi ve ekonomik büyüme değişkenleri, kişi başına düşen karbon emisyonlarını artıran başlıca etmenlerdir. Bu durum, İsrail ekonomisinde karbon yoğun sektörlerin ağırlığını ve dış ticaretin enerji tüketimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Bununla birlikte, yenilenebilir enerji tüketimi ve kentleşme değişkenlerinin karbon emisyonları üzerinde azaltıcı etkide bulunduğu görülmektedir. Japonya için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.22'de sunulmuştur.

Tablo 4.22. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Japonya

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0805	Pozitif
ln(YET)	0.0578	Pozitif
ln(FET)	0.8829	Pozitif
ln(DT)	-0.181	Negatif
ln(DYY)	0.0911	Pozitif
ln(GSYİH)	-0.3372	Negatif
ln(KENT)	0.2496	Pozitif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.8927
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0248
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0311
Görelî Mutlak Hata (RAE)		50.3878 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		45.2362 %

Tablo 4.22'ye göre, modelin MAE (0.0248) ve RMSE (0.0311) değerlerinin düşük olması, modelin hata payının kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. RAE (%50.3878) ve RRSE (%45.2362) değerleri ise modelin veri içindeki tüm değişkenliği tam olarak yansıtamadığını düşündürmektedir. Korelasyon katsayısının ise 0.8927 olması, bağımsız değişkenlerin CO₂ emisyonlarını açıklamada önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Japonya'da ln(FET), ln(DYY), ln(KENT) ve ln(YET) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla (0.8829), (0.0911), (0.2496) ve (0.0578) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. En yüksek pozitif etki fosil enerji tüketiminde gözlenmiştir. 2023 yılında ülkede fosil yakıt tüketiminin birincil enerji tüketimindeki payı %83,42'dir (Our World in Data, 2024f). Bu oran ve analizde elde edilen yüksek pozitif katsayı, Japonya'nın hâlen fosil enerjiye bağımlı olduğunu açıkça göstermektedir ve analiz sonucunu doğrudan desteklemektedir. Japonya'nın 2023 yılında elektrik üretiminin %22,01'i yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmıştır. En büyük katkı güneş enerjisinden (96,99 TWh) gelirken, ardından hidroelektrik (74,50 TWh), biyoenerji (42,05 TWh) ve rüzgâr enerjisi (10,01 TWh) gelmektedir (Our World in Data, 2024l; Our World in Data, 2024m). Bu kompozisyon, özellikle güneş enerjisine dayalı bir strateji izlendiğini gösterirken, toplam katkının düşük kalması yenilenebilir enerji tüketiminin modelde neden artış yönlü (pozitif) katsayıya sahip olduğunu açıklamaktadır. Bu bulgu, enerji dönüşüm sürecinin henüz CO₂ azaltımında etkili seviyeye ulaşmadığını göstermekte ve analiz sonucunu açıklayıcı niteliktedir. Doğrudan yabancı yatırımların (DYY) pozitif etkisi (0.0911), DYY'nin artışına rağmen yatırımların hâlen karbon yoğun sektörlerde yoğunlaştığını göstermektedir. Nitekim 2023 yılında Japonya'da en çok paya sahip doğrudan yabancı yatırımların büyüme oranı en yüksek sektörleri arasında makine, kimyasal ve ilaç ile toptan ve perakende gibi karbon yoğun sektörler yer almaktadır (Japan External Trade Organization [JETRO], 2024). Bu durum ülkede halen DYY'lerin çoğunun karbon yoğun sektörler üzerine gerçekleştiğini göstermekte ve analiz sonucundaki artırıcı etkiyi açıklar niteliktedir. Kentleşme değişkeninin kayda değer bir pozitif katsayıya (0.2496) sahip olması ise Japonya'da yüksek nüfus yoğunluğu, ulaşım talebi ve enerji tüketiminin kişi başına karbon emisyonlarını artırıcı bir baskı oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Ülkede 2011 yılında gerçekleşen nükleer santral kazası gerçekleşmesi

sonucu kentlerdeki enerji ihtiyacını gidermek için fosil enerji tüketimine yönelmiş olmaları bu duruma örnek niteliğindedir (Kharecha ve Sato, 2019).

Öte yandan $\ln(DT)$ ve $\ln(GSYİH)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.181) ve (-0.3372) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. Özellikle ekonomik büyümenin CO_2 emisyonlarını azaltıcı yönde etkili olması dikkat çekicidir. 1991-2022 döneminde kişi başına GSYİH %25 artarken, kişi başına CO_2 emisyonları %12 ve tüketim temelli kişi başına CO_2 emisyonları %10 oranında azalmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu bulgular, analiz sonucunu desteklemekte; Japonya'nın büyüme sürecini çevresel sürdürülebilirlik ile bütünleştirdiğini göstermektedir. Dış ticaretin azaltıcı etkisi de dikkat çekicidir. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO_2 emisyonlarına oranı %14,2'den %15,9'a yükselmiştir (Our World in Data, 2025g). Karbon ithalatçısı konumunda bulunan Japonya'da, dış ticaretin emisyonları azaltıcı yönde etkili olmasının, karbon yoğun üretim süreçlerinin yurt dışına kaydırılmasıyla yerli üretim üzerindeki emisyon baskısının hafıflemesiyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, modelde yer alan sapma terimi (0.0805), tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu durumda tahmin edilen $\ln(CO_2)$ değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak Japonya'da fosil enerji tüketimi ve kentleşme kişi başına karbon emisyonlarını artıran en önemli faktörler olurken, ekonomik büyüme ve dış ticaret emisyonları azaltan en güçlü değişkenler olarak öne çıkmaktadır. Norveç için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.23'te sunulmuştur.

Tablo 4.23. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Norveç

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0805	Pozitif
ln(YET)	-0.1714	Negatif
ln(FET)	0.8387	Pozitif
ln(DT)	-0.1775	Negatif
ln(DYY)	0.0931	Pozitif
ln(GSYİH)	-0.1889	Negatif
ln(KENT)	0.1964	Pozitif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.8315
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0301
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0368
Görelî Mutlak Hata (RAE)		57.0519 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		53.3049 %

Tablo 4.23'e göre, modelin MAE (0.0301) ve RMSE (0.0368) değerleri modelin hata düzeyinin kabul edilebilir olduğunu gösterirken, RAE (%57.0519) ve RRSE (%53.3049) oranları modelin tüm değişkenliği tam yansıtamadığını düşündürmektedir. Korelasyon katsayısının 0.8315 olması ise değişkenlerin Norveç'teki CO₂ emisyonlarını açıklama gücünün diğer ülkelere kıyasla daha sınırlı olabileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, genel anlamda modelin tahmin performansı tatmin edici düzeydedir.

Norveç'te ln(FET), ln(DYY) ve ln(KENT) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla (0.8387), (0.0931) ve (0.1964) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. En yüksek artırıcı etki fosil enerji tüketiminde gözlenmiştir. 2023 yılında ülkede fosil yakıt tüketiminin birincil enerji tüketimi içindeki payı %27,91'dir (Our World in Data, 2024f). Bu oran görelî olarak düşük görünse de model sonucundaki güçlü pozitif etki Norveç'te hâlâ fosil enerjiye dayalı faaliyetlerin mevcut olduğunu ve kişi başına CO₂ emisyonlarını artırmaya devam ettiğini göstermektedir. Bu durum, analiz sonucunu desteklemektedir. Doğrudan yabancı yatırımlar ve kentleşme de emisyonları artıran diğer değişkenlerdir. 1991-2023 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı %-0,29'dan %2,42'ye yükselmiştir (Our World in Data, 2024h). 1990-2023 dönemine ait verilere dayalı olarak Norveç'e yönelik doğrudan yabancı yatırım girişleri sınırlı düzeyde ve ağırlıklı olarak petrol ile enerji sektörlerine yönelik gerçekleştirilmiştir (OECD,

2024b). Ülkede artış gösteren doğrudan yabancı8 yatırımların karbon yoğun sektörlerde yoğunlaşarak üretim süreçlerindeki emisyonları yükseltmesi, analiz sonucu elde edilen DYY değişkeninin kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı etkisini açıklar niteliktedir. Ülkedeki kentleşme oranı ise 2023 itibarıyla %84'tür (Our World in Data, 2024i). Yüksek kentleşme oranı da enerji talebi ve ulaşım kaynaklı emisyonların artışına katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla dışa açılma ve hızlı kentleşme süreci, ekonomik büyümeyi desteklerken aynı zamanda emisyonları artırıcı bir sonuç yaratmaktadır. Ayrıca ülkede Covid-19 sonrası toplu taşıt kullanımı oldukça düşmüş ve 1990'lardan bu yana bisiklet kullanımı ise %7'den yaklaşık %4'e gerilemiştir (Nordengen vd., 2021; Flotve ve Farstad, 2022). Bu durumlar ülkedeki kentleşmeye bağlı olarak gerçekleşen kişi başına CO₂ emisyonlarındaki artırıcı etkiye örnek olarak gösterilebilir.

Öte yandan ln(YET), ln(DT) ve ln(GSYİH) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla (-0.1714), (-0.1775) ve (-0.1889) standart sapmalılık azalışa neden olmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerjinin yüksek azaltıcı etkisi dikkat çekicidir. 2023 yılı itibarıyla Norveç'te yenilenebilir enerjinin birincil enerji tüketimindeki payı %72,09, elektrik üretimindeki payı ise %98,5'tir (Our World in Data, 2024j; Our World in Data, 2024l). Bu yüksek oranlar, modelde elde edilen azaltıcı etkinin temel nedenini oluşturmakta ve sonucu güçlü şekilde desteklemektedir. Ekonomik büyümenin de CO₂ emisyonlarını azaltıcı yönde etki göstermesi dikkat çekicidir. 1991-2022 yılları arasında kişi başına GSYİH %99 artarken, kişi başına CO₂ emisyonları %16 oranında artış göstermiştir (Our World in Data, 2024k). Oranlar, Norveç'in büyümeyi çevresel sürdürülebilirlikle birlikte yürüttüğünü ve analiz sonucundaki azaltıcı etkinin bu politika yapısıyla tutarlı olduğunu göstermektedir. Norveç'te 2003-2022 yılları arasında dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %-3.8'den %-8,5'e düşmüştür (Our World in Data, 2024g). Bu durum, ülkenin gömülü net karbon ihracatçısı olduğunu göstermektedir. Ancak bu bulgu, analiz sonuçlarında ortaya çıkan emisyonları azaltıcı etki ile tam olarak örtüşmemektedir. Fakat dış ticaretin emisyonlar üzerindeki etkisi yalnızca gömülü karbon açısından değil, aynı zamanda üretim ve tüketim süreçlerindeki yapısal dönüşümler, enerji verimliliği ve teknoloji transferi gibi açılardan dikkate alınmalıdır. Norveç dünyanın önde gelen petrol ve doğalgaz ihracatçılarından (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2025). Ülke üretim

bazlı net gömülü karbon ihracatçısı olmasına rağmen ihraç ettiği ürünlerin tüketim temelli emisyonlarından etkilenmemektedir. Bu bağlamda, Norveç'in ihraç ettiği fosil yakıtların tüketimi sonucu ortaya çıkan emisyonlar başka ülkelerin envanterlerine yansdığından, ülke kendi resmi istatistiklerinde bu salımlardan etkilenmemekte ve dış ticaretin ülke kayıtlarında emisyonlar üzerinde azaltıcı bir etki yaratmasını ve analiz sonuçlarıyla uyumlu olmasını mümkün kılmaktadır. Modelde yer alan sapma terimi (0.0805), tüm bağımsız değişkenler standartlaştırılmış düzeyde olduğunda tahmin edilen $\ln(\text{CO}_2)$ değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak, Norveç'te fosil enerji tüketimi kişi başına karbon emisyonlarını artıran en önemli değişken olurken, yenilenebilir enerji tüketimi, ekonomik büyüme ve dış ticaret ise kişi başına karbon emisyonları azaltan en önemli faktörler olarak öne çıkmaktadır. Güney Kore için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.24'te sunulmuştur.

Tablo 4.24. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Güney Kore

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0066	Pozitif
$\ln(\text{YET})$	-0.1805	Negatif
$\ln(\text{FET})$	1.1908	Pozitif
$\ln(\text{DT})$	0.0302	Pozitif
$\ln(\text{DYY})$	-0.0792	Negatif
$\ln(\text{GSYİH})$	0.1648	Pozitif
$\ln(\text{KENT})$	-0.2467	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9858
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0212
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0287
Görelî Mutlak Hata (RAE)		15.2895 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		16.4767 %

Tablo 4.24'e göre, modelin MAE (0.0212) ve RMSE (0.0287) değerlerinin düşük olması, hata seviyesinin makul düzeyde olduğunu göstermektedir. Ayrıca RAE (%15.2895) ve RRSE (%16.4767) değerlerinin de nispeten düşük olması, modelin tahmin performansının başarılı olduğunu göstermektedir. Son olarak korelasyon katsayısının (0.9858) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

Güney Kore’de $\ln(\text{FET})$, $\ln(\text{DT})$ ve $\ln(\text{GSYİH})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ ’de sırasıyla (1.1908), (0.0302) ve (0.1648) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Özellikle fosil enerji tüketimi, kişi başına CO_2 emisyonlarını en fazla artıran değişken olarak öne çıkmaktadır. Güney Kore’nin elektrik enerjisi üretiminde fosil yakıtların payı 1991’de %53,4 iken, 2023 itibarıyla %61,08’e yükselmiştir (Our World in Data, 2024o). Bu veriler, ülkenin elektrik üretiminde fosil kaynaklara olan bağımlılığının zaman içinde arttığını göstermektedir ve modelde elde edilen güçlü artırıcı etkiyi açıklamaktadır. Ekonomik büyüme de kişi başına emisyonları artıran bir diğer etkidir. 1991-2022 döneminde kişi başına GSYİH %291 oranında artarken, kişi başına CO_2 emisyonları %118 ve tüketim temelli kişi başına CO_2 emisyonları %100 artmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu göstergeler, ekonomik büyümenin yüksek karbon yoğunluklu üretim yapıları ile gerçekleştiğini ve analiz sonucunda elde edilen pozitif ilişkinin ampirik olarak desteklendiğini göstermektedir. Dış ticaretin analizde hafif düzeyde artırıcı etkisinin bulunduğu görülmektedir. Ancak 1991-2022 yılları arasında dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO_2 emisyonlarına oranı %23,9’dan %13,2’ye düşmüştür (Our World in Data, 2024g). Ülkenin başlıca ihracat yaptığı ürünler yarı iletkenler, elektronik cihazlar, mobil iletişim cihazları, motorlu kara taşıtları, elektrikli makine ve cihazlar, rafine fosil yakıtlar ve petrokimya ürünleridir (MFA, t.y.- g). Bu açıdan, hem ülkenin net karbon ithalatçısı konumunun zayıflaması hem de üretim süreçlerinde yüksek enerji talebi gerektiren ürünlerin ihracatının yapılması, analiz sonucunda dış ticaretin CO_2 emisyonlarını sınırlı düzeyde de olsa artırıcı etkisini açıklamaktadır.

Öte yandan $\ln(\text{YET})$, $\ln(\text{DYY})$ ve $\ln(\text{KENT})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ ’de sırasıyla (-0.1805), (-0.0792) ve (-0.2467) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. Bu üç değişkenin analizde elde edilen negatif katsayıları, kişi başına CO_2 emisyonlarını azaltıcı yönde etki ettiğini göstermektedir. Yenilenebilir enerjinin birincil enerji tüketimi içindeki payı 1991’de %0,86 iken, 2023’te %4,78’e ulaşmıştır (Our World in Data, 2024j). Bu düşük seviyeye rağmen, yenilenebilir enerjinin emisyonlar üzerindeki azaltıcı etkisinin modelde belirgin olması, mevcut kapasitenin etkili kullanıldığını ve dönüşüm sürecinin olumlu sonuçlar vermeye başladığını ortaya koymaktadır. Bu durum analiz sonucunu desteklemektedir. Kentleşmenin CO_2 emisyonlarını azaltıcı yönde etkili olması ise 2023 yılında

kentleşme oranının %86,3 gibi yüksek bir seviyeye ulaşmış olmasına rağmen, sürdürülebilir kent politikalarının etkili biçimde uygulanmaya başlanmasıyla ilişkilendirilebilir (Our World in Data, 2024i). Nitekim Kore’de en fazla kullanılan ulaşım biçimi toplu taşıma sistemleridir. Seul’de 2004 yılından bu yana toplu taşıma sistemi yeniden düzenlenip genişletilerek sürdürülebilir ulaşım çalışmaları gerçekleştirilmesi bu durumu açıklayıcı birer örnektir (Seoul Metropolitan Government, 2004). Ayrıca, doğrudan yabancı yatırımların 1991-2022 arasında GSYİH içindeki payı %0,44’ten %1,50’ye yükselmiştir (Our World in Data, 2024h). 1990-2001 döneminde Güney Kore’ye yönelik doğrudan yabancı yatırımlar özellikle imalat, elektronik, makine ve ulaştırma ekipmanları gibi karbon yoğun sektörlerde yoğunlaşmıştır (Sachwald, 2002). Bu dönemde yatırımların daha çok enerji ve sanayi temelli olması, kişi başına CO₂ emisyonları üzerinde artırıcı etkinin daha yüksek düzeyde ortaya çıkmasına yol açmıştır. Ancak sonraki dönemlerde özellikle 2023 yılı itibarıyla bakıldığında, doğrudan yabancı yatırımların finans ve sigorta, bilgi ve iletişim, gayrimenkul faaliyetleri gibi görece düşük karbon yoğun sektörlerle de yöneldiği görülmektedir (Lloyds Bank, 2025b). Dolayısıyla ülkeye gelen DYY’lerin sektörel dağılımındaki bu değişim, analiz sonucunda gözlenen kişi başına CO₂ emisyonları üzerindeki azaltıcı etkinin göstergesi niteliğindedir. Son olarak, modelde yer alan sapma terimi (0.0066), tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda tahmin edilen ln(CO₂) değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak Güney Kore’de fosil enerji tüketimi kişi başına karbon emisyonlarını artıran en önemli değişken olurken, yenilenebilir enerji tüketimi ve kentleşme değişkenleri ise kişi başına emisyonları azaltan en önemli faktörler olarak öne çıkmaktadır. Güney Afrika için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.25’te sunulmuştur.

Tablo 4.25. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Güney Afrika

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0236	Negatif
ln(YET)	0.0391	Pozitif
ln(FET)	0.6902	Pozitif
ln(DT)	0.086	Pozitif
ln(DYY)	0.0023	Pozitif
ln(GSYİH)	0.7354	Pozitif
ln(KENT)	-0.4753	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9482
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0259
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0326
Görelî Mutlak Hata (RAE)		29.6855 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		31.8707 %

Tablo 4.25'e göre, MAE (0.0259) ve RMSE (0.0326) değerlerinin makul seviyelerde olması, modelin hata oranlarının kabul edilebilir düzeydedir. Ancak, RAE (%29.6855) ve RRSE (%31.8707) değerlerinin nispeten yüksek olması, modelin veri içindeki değişkenliği tam olarak yansıtamayabileceğini düşündürmektedir. Korelasyon katsayısının (0.9482) olması ise bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu göstermektedir.

Güney Afrika'da ln(YET), ln(FET), ln(DT), ln(DYY) ve ln(GSYİH) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla (0.0391), (0.6902), (0.086), (0.0023) ve (0,7354) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Güney Afrika'da karbon emisyonlarındaki artışına en çok etki eden değişkenler ekonomik büyüme ve fosil enerji kullanımıdır. 2023 yılında ülkede fosil yakıt tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki %94,42'dir (Our World in Data, 2024f). Ülkenin enerji sisteminde hâlâ fosil yakıtların ağırlıkta olması, bu etkinin nedenini açıkça ortaya koymaktadır. Güney Afrika'da 2023 yılında yenilenebilir enerji tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %3,94; toplam elektrik üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edildiği oran %12,52; aynı yılda yenilenebilir enerji kaynakları arasında en fazla elektrik üretimi güneş enerjisinden (15,57 TWh) elde edilmiştir. Onu sırasıyla rüzgâr enerjisi (11,58 TWh), hidroelektrik enerjisi (1,69 TWh) ve biyoenerji ile diğer yenilenebilir kaynaklar (0,41 TWh) takip etmektedir (Our World in Data, 2024j; Our World in Data, 2024l; Our World in Data, 2024m).

Yenilenebilir enerjinin emisyonları artırması, enerji üretiminde fosil kaynakların hâlâ ağırlıklı olmasından ve geçiş sürecindeki altyapı eksiklerinden kaynaklanıyor olabilir. Ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %97 oranında artış gösterirken, kişi başına CO₂ emisyonları ise %24 ve tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %17 oranında artış göstermiştir (Our World in Data, 2024k). Bu durum ekonomik büyüme için elde edilen analiz sonuçlarını destekler niteliktedir. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %-26.1'den %-30,03'e düşerek, %4,2'lik bir azalış meydana gelmiştir (Our World in Data, 2024g). Analiz sonucunda elde edilen 0,086'lık pozitif katsayı ise, ülkenin bu dönemde net karbon ihracatçısı konumunu koruması ve üretim faaliyetlerinin yüksek karbon yoğunluğundan kaynaklı olarak, dış ticaretin CO₂ emisyonları üzerinde artırıcı bir etkiye bulunduğunu göstermektedir. Ülkede 1991-2023 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı %0,19'dan %2,27'ye yükselerek, %2,08'lik artış sergilemiştir (Our World in Data, 2024h). Doğrudan yabancı yatırımların analiz sonucunda kişi başına CO₂ emisyonlarını az da olsa artırıcı yönde etki göstermesi, söz konusu yatırımların büyük ölçüde karbon yoğun sektörlerle yöneldiğini göstermektedir. Nitekim Afrika'da doğal kaynakların kullanıldığı, inşaat ve telekomünikasyon sektörleri üzerine doğrudan yabancı yatırımlar gerçekleştirilmesi bu durumu açıklamaktadır (Trends Research & Advisory, 2024).

Öte yandan ln(KENT) değişkeninde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)'de (-0.4753) standart sapmalık azalışa yol açtığı tespit edilmiştir. Güney Afrika'da kentleşme oranı 1991 yılında %53 iken, 2023 yılında ise %68,5'e yükselmiştir (Our World in Data, 2024i). Ülkede Integrated Urban Development Framework (IUDF) adında ulusal kentsel politika çerçevesi ve Milkwood şehir projesi gibi uygulamalar ile kentleşmenin sürdürülebilir hale gelmesini sağlayacak kapsayıcı, dirençli ve verimli şehirler inşa etmek için çalışmalar yürütülmektedir (De Beer, 2016; Mkhonto vd., 2024). Ülkedeki bu sürdürülebilir kentleşme çalışmaları analiz sonucunu desteklemektedir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.0236) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen ln(CO₂) değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak Güney Afrika'da ekonomik büyüme ve fosil enerji tüketimi kişi başına karbon emisyonlarını artıran en önemli değişkenler olurken, kentleşme ise kişi

başına karbon emisyonlarını azaltan tek faktördür. Küme 1 ülkeleri için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları özet olarak Tablo 4.26’da sunulmuştur.

Tablo 4.26. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Küme 1 Özet Tablosu

Ülke	ln(YET)	ln(FET)	ln(DT)	ln(DYY)	ln(GSYİH)	ln(KENT)
Birleşik Krallık	0.0225	0.969	-0.0691	-0.0267	-0.0937	0.077
	<i>R: 0.9954, MAE: 0.019, RMSE: 0.0244, RAE: 8.2804 %, RRSE: 9.2502 %</i>					
Almanya	0.2231	0.925	0.0035	-0.0187	-0.001	-0.3085
	<i>R: 0.9797, MAE: 0.0198, RMSE: 0.0262, RAE: 20.1304 %, RRSE: 20.3544 %</i>					
Belçika	-0.0679	0.5938	0.062	0.0386	-0.4657	-0.0651
	<i>R: 0.994, MAE: 0.0129, RMSE: 0.0178, RAE: 8.6289 %, RRSE: 10.6751 %</i>					
Danimarka	-0.151	0.8591	0.0139	-0.0332	0.0259	-0.0527
	<i>R: 0.995, MAE: 0.0271, RMSE: 0.0332, RAE: 8.9397 %, RRSE: 9.7452 %</i>					
Finlandiya	0.0086	1.0928	-0.0179	-0.0209	0.0422	0.0957
	<i>R: 0.9951, MAE: 0.0178, RMSE: 0.022, RAE: 9.3648 %, RRSE: 9.6129 %</i>					
Hollanda	-0.6521	0.6316	-0.0393	-0.0426	0.1264	0.1665
	<i>R: 0.9877, MAE: 0.0148, RMSE: 0.0148, RAE: 14.2978 %, RRSE: 15.5982 %</i>					
İrlanda	-0.0099	0.8268	-0.0949	0.0865	0.0236	-0.2078
	<i>R: 0.9956, MAE: 0.0138, RMSE: 0.0169, RAE: 8.4207 %, RRSE: 8.8827 %</i>					
İsrail	-0.2918	0.4113	0.4303	-0.1532	0.1522	-0.0688
	<i>R: 0.876, MAE: 0.0548, RMSE: 0.0625, RAE: 48.8495 %, RRSE: 47.6323 %</i>					
Japonya	0.0578	0.8829	-0.181	0.0911	-0.3372	0.2496
	<i>R: 0.8927, MAE: 0.0248, RMSE: 0.0311, RAE: 50.3878 %, RRSE: 45.2362 %</i>					
Norveç	-0.1714	0.8387	-0.1775	0.0931	-0.1889	0.1964
	<i>R: 0.8315, MAE: 0.0301, RMSE: 0.0368, RAE: 57.0519 %, RRSE: 53.3049 %</i>					
Güney Kore	-0.1805	1.1908	0.0302	-0.0792	0.1648	-0.2467
	<i>R: 0.9858, MAE: 0.0212, RMSE: 0.0287, RAE: 15.2895 %, RRSE: 16.4767 %</i>					
Güney Afrika	0.0391	0.6902	0.086	0.0023	0.7354	-0.4753
	<i>R: 0.9482, MAE: 0.0259, RMSE: 0.0326, RAE: 29.6855 %, RRSE: 31.8707 %</i>					

Tablo 4.26’ya göre, küme 1 ülkelerinde kişi başına CO₂ emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimidir. Bu etki Güney Kore (1.1908), Finlandiya (1.0928) ve Birleşik Krallık (0.969) gibi ülkelerde oldukça belirgindir. Bu durum, bu ülkelerde fosil kaynakların enerji sistemindeki baskınlığını göstermektedir.

Yenilenebilir enerji tüketiminin etkisi ülkelere göre değişmektedir. Hollanda (-0.6521), İsrail (-0.2918) ve Norveç (-0.1714) gibi ülkelerde emisyonları azaltıcı yönde etkide bulunurken; Almanya (0.2231) ve Japonya (0.0578) gibi ülkelerde bu

değişkenin sınırlı da olsa artırıcı etkisi gözlemlenmiştir. Bu farklar, yenilenebilir kaynakların sisteme entegrasyon seviyesiyle bağlantılı olabilir.

Kentleşme bazı ülkelerde emisyonları azaltıcı rol oynamaktadır. Güney Afrika (-0.4753), Güney Kore (-0.2467) ve İrlanda (-0.2078) gibi ülkelerde bu etki dikkat çekerken; Japonya (0.2496) ve Norveç (0.1964) gibi ülkelerde ise artış yönlü bir ilişki söz konusudur.

Dış ticaretin CO₂ üzerindeki etkisi de farklılık göstermektedir. İsrail (0.4303) ve Güney Afrika (0.086) için artırıcı ve özellikle İsrail için oldukça yüksek bir etkisi bulunmakta olup, Japonya (-0.181), Norveç (-0.1775) ve İrlanda (-0.0949) için ise azaltıcı yöndedir.

Doğrudan yabancı yatırımların etkisi genellikle sınırlıdır. İsrail (-0.1532) ve Hollanda (-0.0426) gibi ülkelerde düşürücü etkisi görülürken, Japonya (0.0911) ve Norveç (0.0931) gibi ülkelerde ise artırıcı yönde etkiler mevcuttur. Ekonomik büyüme değişkeni de farklı yönlerde etkiler göstermektedir. Güney Afrika (0.7354) ve Hollanda (0.1264) gibi ülkelerde artış yönlü bir etkisi varken, Belçika (-0.4657), Japonya (-0.3372) ve Norveç (-0.1889) gibi ülkelerde düşürücü etkiler gözlemlenmiştir.

Bu kümedeki ülkelerde kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran unsur, fosil enerji tüketimidir. Yenilenebilir enerji kullanımı ve kentleşme değişkenleri birçok ülkede emisyonları azaltıcı etki gösterse de bu etkinin ülkeler arasında tutarlılık göstermediği dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, dış ticaret ve doğrudan yabancı yatırımlar değişkenlerinin bazı ülkelerde emisyonları düşürücü yönde etkide bulunması önemli bir bulgu niteliğindedir. Ayrıca, ekonomik büyümenin bazı gelişmiş ülkelerde emisyonları azaltıcı yönde etkili olması, bu ülkelerde daha az karbon yoğun sektörlerin ön planda olabileceğini düşündürmektedir. Dolayısıyla, fosil enerji tüketiminin karbon emisyonları üzerindeki baskın rolü açıkça ortaya çıkarken; yenilenebilir enerji, kentleşme ve ekonomik yapının niteliği gibi faktörlerin etkisi ise ülke koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Küme 2 Ülkeleri için DVR Bulguları

X-Means algoritması kullanılarak gerçekleştirilen kümeleme analizi sonucunda, Küme 2’de Çin, İspanya, İtalya, Yunanistan, Fransa, İsveç, İsviçre ve Macaristan

ülkeleri tespit edilmiştir. Çin için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.27’de sunulmuştur.

Tablo 4.27. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Çin

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0025	Negatif
ln(YET)	-0.0575	Negatif
ln(FET)	0.9303	Pozitif
ln(DT)	-0.0547	Negatif
ln(DYY)	0.0165	Pozitif
ln(GSYİH)	0.2212	Pozitif
ln(KENT)	-0.0646	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9989
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0181
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0238
Görelî Mutlak Hata (RAE)		3.8103 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		4.625 %

Tablo 4.27’ye göre, modelin MAE (0.0181) ve RMSE (0.0238) değerlerinin oldukça düşük olması, modelin hata seviyesinin çok düşük olduğunu göstermektedir. RAE (%3.8103) ve RRSE (%4.625) değerlerinin de düşük olması, modelin tahmin performansının yüksek olduğunu göstermektedir. Korelasyon katsayısının (0.9989) oldukça yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

Çin’de ln(FET), ln(DYY) ve ln(GSYİH) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)’de sırasıyla (0.9303), (0.0165) ve (0.2212) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Özellikle fosil enerji tüketimi, karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olarak öne çıkmaktadır. Çin’in fosil enerji tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı 1991 yılında %95,58 iken; 2023 yılında %81,55’e düşmüştür. 2023 yılı kişi başına fosil enerji kullanımı ise 38.677,41 kWh olarak yüksek seviyede tüketim miktarını sergilemiştir (Our World in Data, 2024f; Our World in Data, 2024n). Bu durum, her ne kadar fosil enerji kullanımında görelî bir azalma yaşansa da toplam tüketim miktarının hâlâ oldukça yüksek seviyelerde seyrettiğini göstermekte ve fosil yakıtların Çin’in enerji sistemi içindeki baskın rolünü sürdürdüğünü ve analiz sonucunu destekler niteliktedir. Ekonomik

büyümenin de emisyonları artırıcı etkisi, sanayi ve üretim faaliyetlerinin yüksek enerji talebiyle ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %1.354 oranında artış gösterirken, kişi başına CO₂ emisyonları ise %336 ve tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %330 oranında artış göstermiştir (Our World in Data, 2024k). Bu durum, ekonomik büyümenin yapısal olarak enerji yoğun sektörler üzerinden gerçekleştiğini ve sürdürülebilirlik açısından ciddi çevresel maliyetler doğurduğunu göstermektedir. DYY karbon emisyonlarını (0.0165) standart sapmalık artırıcı yönde etkilemektedir. Çin'e yapılan doğrudan yabancı yatırımlar, yüksek enerji tüketimli ve kirlilik yoğun sanayi ürünlerine yöneliktir (Xuchong, 2025). Bu durum emisyonları artıracığından analiz sonuçlarını desteklemektedir.

Öte yandan $\ln(YET)$, $\ln(DT)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.0575), (-0.0547) ve (-0.0646) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. Yenilenebilir enerji tüketiminin karbon emisyonlarını azaltıcı bir etkisi bulunmasına rağmen, bu etkinin görece sınırlı düzeyde kalması, yenilenebilir kaynak kullanım oranlarının yeterince yüksek olmamasıyla ilişkilendirilebilir. Nitekim, Çin'de 2023 yılı itibarıyla yenilenebilir enerjinin birincil enerji tüketimi içindeki payı %16,16, toplam elektrik üretiminde ise %30,6 düzeyindedir (Our World in Data, 2024j; Our World in Data, 2024l). Bu oranlar, yenilenebilir enerjinin emisyonları azaltmadaki potansiyelinin henüz tam olarak kullanılmadığını göstermektedir. Dış ticaretin ve kentleşmenin karbon emisyonlarını azaltıcı etkisi, bu faktörlerin sürdürülebilir üretim süreçleri ve çevre dostu kentleşme politikalarıyla ilişkilendirilebileceğini göstermektedir. Nitekim, 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %-7,9'dan %-9,2'ye düşerek %1,3'lük bir azalış göstermiştir (Our World in Data, 2024g). Bu da ülkenin net karbon ihracatçısı konumunu güçlendirdiğini göstermektedir. Çin'in ithalatına bakılacak olursa, başta elektrikli makina ve cihazlar ile demir ve bakır cevheri gibi aramalı ürünleri ithal etmektedir (MFA, t.y.-h). Bu ürünlerin ithalatı ile yüksek karbon yoğunluklu girdiler ile sanayisinin gelişimini sağlamakla birlikte ülkede dolaylı emisyon artışını meydana getirmektedir. Bu durum ise analiz sonucunu destekler niteliktedir. Ülkenin 2023 yılı itibarıyla ülkede kentleşme oranı %56,5 düzeyindedir (Our World in Data, 2024i). Ülkede Sponge city, yeşil mahalle, elektrikli otobüs filosu gibi sürdürülebilir

kentleşme politikaları hayata geçirilmiştir (Du vd., 2019; Zhang vd., 2019; Guan vd., 2021). Bu tür uygulamalar ise ülkede kentleşmenin CO₂ emisyonlarını azaltıcı bir işlev görmesine katkıda bulunmakta ve analiz sonuçlarını desteklemektedir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.0025) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen ln(CO₂) değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak Çin’de fosil enerji tüketimi ve ekonomik büyüme karbon emisyonlarını artıran en önemli değişkenler olurken, yenilenebilir enerji tüketimi, dış ticaret ve kentleşme emisyonları azaltan faktörler olarak öne çıkmaktadır. İspanya için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.28’de sunulmuştur.

Tablo 4.28. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: İspanya

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0182	Pozitif
ln(YET)	-0.0727	Negatif
ln(FET)	0.8844	Pozitif
ln(DT)	-0.0588	Negatif
ln(DYY)	0.0168	Pozitif
ln(GSYİH)	-0.072	Negatif
ln(KENT)	-0.1005	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9856
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0228
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0294
Görelî Mutlak Hata (RAE)		15.6726 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		16.4579 %

Tablo 4.28’e göre, modelin MAE (0.0228) ve RMSE (0.0294) değerlerinin düşük olması, modelin hata seviyesinin düşük olduğunu göstermektedir. RAE (%15.6726) ve RRSE (%16.4579) değerlerinin makul seviyede olması, modelin tahmin performansının başarılı olduğunu göstermektedir. Korelasyon katsayısının (0.9856) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

İspanya’da ln(FET) ve ln(DYY) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)’de sırasıyla (0.8844) ve (0.0168) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Özellikle fosil enerji tüketimi, karbon emisyonlarını en fazla artıran

değişken olarak öne çıkmaktadır, bu da İspanya'nın hâlâ fosil enerjilere bağımlı bir enerji üretim yapısına sahip olduğunu göstermektedir. Nitekim fosil enerji tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı 1991 yılında %78,29 iken; 2023 yılında %66,08'e düşmüştür (Our World in Data, 2024f). Fakat bu düşüşe rağmen, fosil yakıtların toplam enerji sepeti içerisindeki ağırlığı hâlâ oldukça yüksektir. Bu durum, İspanya'nın enerji dönüşüm sürecinde ilerleme kaydetmiş olsa da karbon emisyonlarını azaltmak için daha kapsamlı ve kararlı politikalara ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Doğrudan yabancı yatırımların emisyonlar üzerindeki artırıcı etkisi, yatırımların enerji ve karbon yoğun sektörler yöneldiği olabileceğini düşündürmektedir. Nitekim model sonucuna göre, DYY'nin karbon emisyonlarını artırıcı yöndeki etkisi (0.0168) olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, 1991-2023 yılları arasında doğrudan yabancı yatırımların GSYİH içindeki payı %2,17'den %2,65'e yükselerek yalnızca 0,48'lik bir artış göstermiştir (Our World in Data, 2024h). DYY'de artış yaşanmasının yanı sıra analiz sonucundaki artırıcı etki ülkeye yapılan DYY'lerin emisyon artırıcı faaliyetleri kapsadığını işaret etmektedir. Nitekim Soto ve Edeh'in (2025) çalışmalarında da İspanya'da doğrudan yabancı yatırımların çevresel düzenlemelerin esnekliği nedeniyle karbon yoğun sektörler yöneldiği ve ülkenin kirlilik cenneti haline geldiğinin tespit edilmesi analiz sonucunu açıklar nitektedir.

Öte yandan $\ln(YET)$, $\ln(DT)$, $\ln(GSYİH)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalı değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.0727), (-0.0588), (-0.072) ve (-0.1005) standart sapmalı azalışa yol açmaktadır. Bu sonuçlar, yenilenebilir enerji, dış ticaret, ekonomik büyüme ve kentleşmenin emisyonları azaltıcı yönde katkı sunduğunu göstermektedir. Modelde elde edilen (-0.0727)'lik katsayı, yenilenebilir enerji tüketiminin karbon emisyonları üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, yenilenebilir enerji kullanımının çevresel faydalarını ortaya koymaktadır. Ancak söz konusu etki katsayısının görece düşük olması, yalnızca yenilenebilir enerji kullanım oranının sınırlı düzeyde kalmasıyla değil, aynı zamanda yenilenebilir kaynakların mevcut teknik potansiyelinin de sınırlı olmasıyla ilişkilendirilebilir. Nitekim 2023 yılı itibarıyla, yenilenebilir enerjinin birincil enerji tüketimi içindeki payı %24,92, elektrik üretiminde ise %51,60 düzeyindedir (Our World in Data, 2024j; Our World in Data, 2024l). Bu oranlar, yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaşmakta olduğunu göstermekle birlikte, bu

kaynakların emisyonları azaltma etkisinin belirli bir sınırdan kaldığını da ortaya koymaktadır. Dış ticaret değişkeni için elde edilen (-0.0588)'lik katsayı, dış ticaretin emisyonları sınırlayıcı etkisine işaret etmektedir. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %12,6'dan %16,3'e yükselmiş, bu da emisyonların daha fazla tüketim temelli yani dış kaynaklı hale geldiğini göstermektedir (Our World in Data, 2024g). Bu durum, ülkedeki karbon salımının bir kısmının üretim süreçleriyle birlikte dış ülkelere taşınmış olduğunu göstermektedir. Böylece, iç piyasada doğrudan oluşan emisyon yükü belli ölçüde hafiflemiş görünmektedir. Ekonomik büyüme değişkenine ait (-0.072)'lik ağırlık katsayısı, kişi başına GSYİH artışının emisyonları sınırlı da olsa azaltıcı etki yarattığını ortaya koymaktadır. Bu durum, 1991-2022 yılları arasında kişi başına GSYİH'nin %76 oranında artmasına rağmen, kişi başına CO₂ emisyonlarının yalnızca %-2 azalırken, tüketim temelli emisyonların ise %1 artmış olmasıyla açıklanabilir (Our World in Data, 2024k). 2023 yılı itibarıyla ülkede kentleşme oranı %81,5'tir (Our World in Data, 2024i). Yüksek kentleşmenin yanında İspanya'da sürdürülebilir kentleşme kapsamında İspanyol Kentsel Gündemi, süperblok, Ciudad 21 programı ve Madrid'de uygulanan düşük emisyon bölgeleri gibi çeşitli politikalar yürütülmektedir (Llamas-Sánchez vd., 2010; López vd., 2020; Tarriño-Ortiz vd., 2021; Diaz-Sarachaga, 2024). Ülkede uygulanan bu tür kentleşme politikalarının etkisi, çalışmada analiz sonucu elde edilen kentleşme değişkeninin kişi başına CO₂ emisyonlarına olan azaltıcı etkisini (-0.1005) açıklamaktadır. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (0.0182) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen ln(CO₂) değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak İspanya'da fosil enerji tüketimi kişi başına karbon emisyonlarını artıran en önemli değişken olurken, yenilenebilir enerji tüketimi ve kentleşme emisyonları azaltan faktörler olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, ekonomik refah düzeyindeki yükselişin çevreci politikaları ve sürdürülebilir enerji teknolojilerini destekleyici bir etki yarattığını göstermektedir. Modelin genel tahmin performansı başarılı olup, karbon emisyonlarını etkileyen faktörler üzerinde sürdürülebilir enerji politikalarının ve çevreci ekonomik uygulamaların etkili olduğu görülmektedir. İtalya için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.29'da sunulmuştur.

Tablo 4.29. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: İtalya

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.023	Pozitif
ln(YET)	-0.003	Negatif
ln(FET)	0.715	Pozitif
ln(DT)	-0.0008	Negatif
ln(DYY)	0.0244	Pozitif
ln(GSYİH)	0.1016	Pozitif
ln(KENT)	-0.3095	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9904
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0191
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0227
Görelî Mutlak Hata (RAE)		12.6205 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		13.3494 %

Tablo 4.29'a göre, modelin MAE (0.0191) ve RMSE (0.0227) değerlerinin düşük olması, modelin hata seviyesinin düşük olduğunu göstermektedir. RAE (%12.6205) ve RRSE (%13.3494) değerlerinin makul seviyede olması, modelin tahmin performansının başarılı olduğunu göstermektedir. Korelasyon katsayısının (0.9904) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

İtalya'da ln(FET), ln(DYY) ve ln(GSYİH) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla (0.715), (0.0244) ve (0.1016) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. İtalya'da fosil enerji tüketimi, kişi başına düşen karbon emisyonlarını en fazla artıran etken olarak öne çıkmaktadır. Nitekim ülkede fosil enerji tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı 1991 yılında %92,98 iken, 2023 yılında bu oran %80,72'ye gerilemiştir. Bu azalma, fosil yakıt kullanımında bir düşüş olduğunu gösterse de fosil kaynakların hâlâ enerji sisteminde baskın konumda olduğunu ortaya koymaktadır (Our World in Data, 2024f). Bu durum, İtalya'nın karbon emisyonlarını azaltma çabalarına rağmen, fosil yakıtlara olan bağımlılığının devam ettiğini göstermekte ve model sonuçlarını desteklemektedir. Ekonomik büyümenin emisyonlar üzerindeki artırıcı etkisi, genişleyen sanayi ve hizmet sektörlerinin artan enerji talebiyle ilişkilendirilebilir. Ancak ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %26 oranında artarken, kişi başına CO₂ emisyonları %22 ve tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları %21 azalmıştır (Our

World in Data, 2024k). Oranlar, ekonomik büyümenin emisyonları aynı oranda artırmadığını ve büyüme ile emisyon ilişkisinin sınırlı kaldığını, güçlü bir pozitif ilişki ortaya koymadığını göstermektedir. Bu durum ise analizde elde edilen ekonomik büyümenin emisyonlar üzerindeki artırıcı etkisinin düşük düzeyde gerçekleştiğini desteklemektedir. Doğrudan yabancı yatırımların emisyonları artırıcı etkisi ise ülkeye yönelen yatırımların enerji yoğun sektörlerde yoğunlaşmış olabileceğine işaret etmektedir. Ülkede 1991-2023 yılları arasında doğrudan yabancı yatırımların GSYİH'ye oranının %0,19'dan %1,83'e yükselerek %1,64'lük artış göstermiştir (Our World in Data, 2024h). Analiz sonucu yatırımlardaki bu artış sonucu, emisyon etkisi yüksek sektörlerdeki faaliyetlerde de yaşanan artışa işaret etmektedir. Nitekim Javed vd. (2023) çalışmalarında da İtalya'da doğrudan yabancı yatırımların emisyonları artırdığı ve çevresel bozulmanın yaşandığı sonucuna ulaşmış olmaları bu durumu destekler niteliktedir.

Öte yandan $\ln(YET)$, $\ln(DT)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.003), (-0.0008) ve (-0.3095) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. Bu sonuçlar, söz konusu değişkenlerin karbon emisyonlarını azaltıcı etkiler taşıdığını göstermektedir. 2023 yılı itibarıyla İtalya'nın kentleşme oranı %72,5 seviyesindedir (Our World in Data, 2025e). Kentleşmenin emisyonları azaltıcı etkisi, ülkedeki şehirleşme süreçlerinin düşük karbonlu ulaşım sistemleri, enerji verimli altyapılar ve sürdürülebilir kentsel planlamalarla destekleniyor olabileceğini düşündürmektedir. Nitekim ülkede İtalya'da sürdürülebilir kentleşme kapsamında akıllı şehir uygulamaları (Smart City), G7 Sürdürülebilir Kent Gelişimi Gündemi (G7 Sustainable Urban Development Agenda), Milan Area C ve Yavaş Şehir (Cittaslow) gibi politikalar yürütülmektedir (Menga vd., 2013; Vattano, 2013; Belli ve Çelik, 2022; Murshed vd., 2023). Bu politikaların ve uygulamaların varlığı ülkede kentleşmenin kişi başına (CO_2) emisyonları üzerindeki azaltıcı etkisini açıklamaktadır. Benzer şekilde, yenilenebilir enerji tüketiminin de karbon emisyonlarını azaltıcı etkisi olmakla birlikte, bu etkinin görece sınırlı kalması, yenilenebilir enerji kaynaklarının hâlâ ülkenin enerji sisteminde yeterince baskın olmamasından kaynaklanmaktadır. Nitekim 2023 yılında toplam elektrik üretiminin yalnızca %44,6'sı yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmıştır (Our World in Data, 2024l). Model sonuçlarına göre dış ticaretin karbon emisyonları üzerinde sınırlı da olsa azaltıcı etkisi bulunmaktadır. Bu etki, İtalya'nın üretim temelli emisyonlarının

bir kısmını dış kaynaklara kaydırmasıyla ilişkilendirilebilir. Nitekim 1991–2022 yılları arasında dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %28,0’dan %29,3’e yükselmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu oran, İtalya’nın net CO₂ ithalatçısı olduğunu ve yerli üretimdeki karbon yükünün görece daha düşük tutulabildiğini göstermektedir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (0.023) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen $\ln(\text{CO}_2)$ değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak İtalya’da kişi başına düşen karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimidir. Buna karşın, kentleşmenin emisyonlar üzerindeki azaltıcı etkisi belirgindir. Yenilenebilir enerji tüketiminin etkisi ise oldukça sınırlı düzeyde kalmıştır. Yunanistan için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.30’da sunulmuştur

Tablo 4.30. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Yunanistan

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0157	Negatif
$\ln(\text{YET})$	0.0397	Pozitif
$\ln(\text{FET})$	0.8989	Pozitif
$\ln(\text{DT})$	-0.0851	Negatif
$\ln(\text{DYY})$	-0.0294	Negatif
$\ln(\text{GSYİH})$	-0.0968	Negatif
$\ln(\text{KENT})$	-0.178	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9857
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0265
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0338
Görelî Mutlak Hata (RAE)		15.4511 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		16.3707 %

Tablo 4.30’a göre, MAE (0.0265) ve RMSE (0.0338) değerleri modelin hata seviyesinin düşük olduğunu göstermektedir. RAE (%15.4511) ve RRSE (%16.3707) değerleri de modelin tahmin performansının başarılı olduğunu işaret etmektedir. Korelasyon katsayısının (0.9857) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

Yunanistan’da $\ln(\text{FET})$ ve $\ln(\text{YET})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ ’de sırasıyla (0.8989) ve (0.0397) standart sapmalık artışa

neden olmaktadır. Fosil enerji tüketimi, karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olarak öne çıkarken, yenilenebilir enerji tüketiminin de az da olsa pozitif yönlü etkisi bulunmuştur. 2023 yılında ülkede fosil yakıt tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki %78,36'dır (Our World in Data, 2024f). Bu oran, fosil yakıtların hâlâ ülke enerji sisteminde baskın konumda olduğunu göstermektedir. Nitekim sonuçlar Yunanistan'da 2023 yılında yenilenebilir enerji tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %21,64; 2023'te yenilenebilir enerji kaynakları arasında en fazla elektrik üretimi rüzgâr enerjisinden (10,92 TWh) elde edilirken; onu sırasıyla güneş enerjisi (8,89 TWh), hidroelektrik enerjisi (3,82 TWh) ve biyoenerji ile diğer yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerji (0,65 TWh) takip etmektedir (Our World in Data, 2024j; Our World in Data, 2024l; Our World in Data, 2024m). Her ne kadar Yunanistan'da 2023 yılı itibarıyla yenilenebilir enerji tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %21,64 gibi kayda değer bir seviyeye ulaşmış olsa da bu oran hâlâ enerji sisteminde fosil kaynakların baskınlığını tamamen ortadan kaldıracak düzeyde değildir. Yenilenebilir enerji üretiminin büyük kısmı rüzgâr (10,92 TWh) ve güneş (8,89 TWh) gibi değişken kaynaklardan sağlanmakta olup, bu tür kaynaklar enerji arz güvenliği açısından destekleyici fosil yakıt gereksinimini ortadan kaldıramamaktadır. Ayrıca hidroelektrik (3,82 TWh) ve biyoenerji ile diğer yenilenebilir kaynaklardan (0,65 TWh) elde edilen üretim miktarlarının görece düşük kalması, toplam sistemin emisyon azaltıcı etkisini sınırlamaktadır. Bu durum, modelde yenilenebilir enerji tüketiminin kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltmak yerine hafif düzeyde artırıcı yönde etki göstermesini açıklayabilir.

Öte yandan $\ln(DT)$, $\ln(DYY)$, $\ln(GSYİH)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.0851), (-0.0294), (-0.0968) ve (-0.178) standart sapmalılık azalışa yol açmaktadır. Özellikle kentleşmenin etkisinin diğer değişkenlere kıyasla daha belirgin olması dikkat çekicidir. Nitekim Yunanistan'da 2023 yılı itibarıyla kentleşme oranı %68,1'dir (Our World in Data, 2024i). Bu oran, ülkede şehirleşmenin daha sürdürülebilir kent politikaları, düşük karbonlu ulaşım sistemleri ve enerji verimli altyapılarla destekleniyor olabileceğini düşündürmektedir. Nitekim Yunanistan'da Ellinikon kentsel dönüşüm projesi, akıllı ve iklim-nötr şehir girişimi ve ulusal enerji ve iklim planı gibi uygulamaların yürütülmesi, ülkede sürdürülebilir kentleşme politikalarının gelişmesine ve karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Stamopoulos vd., 2021;

Lampropoulos vd., 2022; Papantoniou vd., 2024). Bu uygulamaların ülkedeki varlığı ise analiz sonucunu desteklemektedir. Benzer şekilde, doğrudan yabancı yatırımların emisyonları azaltıcı yönde etkisi, yatırım girişlerinin daha az enerji yoğun sektörlere yönelmiş olabileceğini ima etmektedir. 1991-2023 yılları arasında doğrudan yabancı yatırımların GSYİH'ye oranı %1,09'dan %1,94'e yükselerek %0,85'lik bir artış göstermiştir (Our World in Data, 2024h). Ekonomik büyümenin negatif etkisi ise GSYİH düzeyinde yaşanan artışa rağmen emisyonlarda azalma gözlenmesiyle uyumludur. 1991-2022 yılları arasında kişi başına GSYİH %32 oranında artarken, kişi başına CO₂ emisyonları %30 ve tüketim temelli CO₂ emisyonları ise %49 oranında azalmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu durum, analiz sonuçlarıyla örtüşmektedir. Dış ticaretin karbon emisyonlarını azaltıcı etkisi ise görece sınırlı düzeydedir. Ancak bu etki, dış ticaret yapısındaki dönüşümle birlikte anlam kazanmaktadır. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %14,4'ten %-16,2'ye düşerek %30,6'lık bir azalış göstermiştir (Our World in Data, 2024g). Bu önemli değişim, Yunanistan'ın net CO₂ ithalatçısı pozisyonundan net ihracatçı konumuna geçtiğini göstermekte olup, analizden elde edilen -0,0851'lik negatif katsayı, modelin yıllık verilere dayalı olması nedeniyle, incelenen dönemin büyük kısmında ülkenin net karbon ithalatçısı konumunun daha fazla süre ile devam etmesi ile açıklanabilir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.0157) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen ln(CO₂) değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak Yunanistan'da karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimidir. Buna karşılık, özellikle kentleşme ve ekonomik büyüme değişkenlerinin belirgin azaltıcı etkisi görülmektedir. Fransa için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.31'de sunulmuştur.

Tablo 4.31. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Fransa

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0281	Negatif
ln(YET)	-0.074	Negatif
ln(FET)	0.7628	Pozitif
ln(DT)	0.0717	Pozitif
ln(DYY)	0.0024	Pozitif
ln(GSYİH)	-0.0583	Negatif
ln(KENT)	-0.2362	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9932
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0135
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0179
Görelî Mutlak Hata (RAE)		10.083 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		11.6823 %

Tablo 4.31'e göre, modelin MAE (0.0135) ve RMSE (0.0179) değerlerinin oldukça düşük olması, modelin hata seviyesinin düşük olduğunu göstermektedir. RAE (%10.083) ve RRSE (%11.6823) değerleri de modelin tahmin performansının başarılı olduğunu işaret etmektedir. Korelasyon katsayısının (0.9932) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün oldukça güçlü olduğunu ortaya koymaktadır.

Fransa'da ln(FET), ln(DT) ve ln(DYY) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla (0.7628), (0.0717) ve (0.0024) standart sapmalılık artışa neden olmaktadır. Fransa'da kişi başına düşen karbon emisyonlarını en fazla artıran faktör, model sonuçlarına göre fosil enerji tüketimidir. 2023 yılında ülkede fosil yakıtların birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %48,03 olup, bu oran fosil kaynakların hâlen önemli bir yer tuttuğunu ortaya koymaktadır (Our World in Data, 2025b). Dış ticaretin emisyonlar üzerindeki artırıcı etkisi görece sınırlı olmakla birlikte, bu etkinin yönü pozitiftir. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %20,6'dan %39,1'e yükselerek %18,5'lik bir artışa işaret etmektedir (Our World in Data, 2024g). Bu artış, Fransa'nın zamanla daha fazla karbon yoğun ürün ithal ettiğini ve tüketim kaynaklı emisyonların artmasına katkı sağladığını göstermektedir. Fransa'nın ithalatı ise uçak ve uzay sanayi ürünleri, otomobil yan sanayi parçaları, çeşitli makineler ve cihazlar ile kimya sektöründe temel kimyasallar, azotlu ürünler,

plastikler ve sentetik kauçuk üzerinedir (MFA, t.y.-1). Nitekim ülkenin ithalatında öne çıkan uçak ve uzay sanayi ürünleri, otomobil yan sanayi parçaları, kimya sektöründe temel kimyasallar, azotlu ürünler, plastikler ve sentetik kauçuk gibi ürünlerin tüketildiklerinde meydana gelecek olan yüksek karbon salınımı, analiz sonucunda dış ticaret değişkeninin kişi başına CO₂ emisyonları üzerindeki artırıcı etkisini destekler niteliktedir. Doğrudan yabancı yatırımların etkisi oldukça düşük düzeyde kalmakta ve modelde küçük bir pozitif katsayıya sahip olmasına rağmen, ülke verileri bu etkinin giderek azaldığını ortaya koymaktadır. Nitekim ülkede 1991-2023 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı %1,20'den %0,29'a düşerek %0,91'lik bir azalış göstermiştir (Our World in Data, 2024h).

Öte yandan $\ln(YET)$, $\ln(GSYİH)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.074), (-0.0583) ve (-0.2362) standart sapmalık azalışa neden olmaktadır. Yenilenebilir enerji tüketiminin etkisi (-0.074) sınırlı düzeyde olsa da enerji sisteminde temiz kaynakların kullanımının emisyonları düşürme potansiyelini yansıtmaktadır. 2023 yılında yenilenebilir enerji birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %16,94; toplam elektrik üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edildiği oran %26,5'tir (Our World in Data, 2024j; Our World in Data, 2024l). Ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %60 oranında artış gösterirken, kişi başına CO₂ emisyonları ise %30 ve tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %19 oranında azalmıştır (Our World in Data, 2024k). Ekonomik büyümenin etkisinin negatif olması (-0.0583), büyümenin daha az karbon yoğun sektörler üzerinden gerçekleştiğini veya çevreci üretim teknolojilerinin yaygınlaştığını düşündürmektedir. Ülkede 2023 yılında kentleşme oranı %88,0'dır (Our World in Data, 2024i). Kentleşmenin en güçlü azaltıcı etkiyi göstermesi (-0.2362), şehirleşme süreçlerinin sürdürülebilir ulaşım, enerji verimli altyapılar ve çevre dostu kentsel politikalarla desteklendiğini ortaya koymaktadır. Fransa'da ÉcoQuartier Programı, Yüksek Enerjili Binalar (HQE), Grenoble'ın Avrupa Yeşil Başkenti seçilmesi ve Atık Azaltımı ile Döngüsel Ekonomi Yasası gibi sürdürülebilir kentleşmeyi destekleyen uygulamalar hayata geçirilmiştir (Sánchez Cordero vd., 2019; Pantic ve Milijic, 2021; Doussard ve Fonticelli, 2022; Colaço ve de Abreu e Silva, 2025). Söz konusu uygulamaların varlığı ise ülkede kentleşmenin sürdürülebilir olması ve emisyon azaltımı için yapısal bir çerçeve sunmasından dolayı analiz sonucu elde edilen kentleşme değişkeninin kişi başına CO₂ emisyonları

üzerindeki azaltıcı etkisini açıklamaktadır. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.0281) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen $\ln(\text{CO}_2)$ değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak Fransa’da kişi başına düşen karbon emisyonlarını en fazla artıran değişkenin fosil enerji tüketimi olduğu görülmektedir. Dış ticaret değişkeni de artış yönlü ancak sınırlı düzeyde bir etki göstermektedir. Buna karşılık, kentleşme değişkeni en güçlü azaltıcı etkiye sahiptir. İsveç için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.32’de sunulmuştur.

Tablo 4.32. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: İsveç

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0104	Pozitif
$\ln(\text{YET})$	0.0079	Pozitif
$\ln(\text{FET})$	0.7731	Pozitif
$\ln(\text{DT})$	0.0111	Pozitif
$\ln(\text{DYY})$	0.0072	Pozitif
$\ln(\text{GSYİH})$	-0.1035	Negatif
$\ln(\text{KENT})$	-0.13	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9957
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0185
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0232
Görelî Mutlak Hata (RAE)		8.0199 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		8.9762 %

Tablo 4.32’ye göre, modelin MAE (0.0185) ve RMSE (0.0232) değerlerinin düşük olması, modelin hata seviyesinin düşük olduğunu göstermektedir. RAE (%8.0199) ve RRSE (%8.9762) değerlerinin de oldukça düşük olması, modelin tahmin performansının yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Korelasyon katsayısının (0.9957) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

İsveç’te $\ln(\text{YET})$, $\ln(\text{FET})$, $\ln(\text{DT})$ ve $\ln(\text{DYY})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ ’de sırasıyla (0.0079), (0.7731), (0.0111) ve (0.0072) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. İsveç’te karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimi olmuştur. Diğer değişkenlerin etkileri ise oldukça sınırlı düzeyde artış yönlüdür. Ülkede fosil enerjinin birincil enerji

tüketimi içerisindeki payı 1991 yılında %36,02 iken; 2023 yılında %25,90'a düşmüştür. 2023 yılında elektrik enerjisi üretimi için kullanılan yenilenebilir enerji miktarları ise rüzgâr enerjisi (34,64 TWh), hidroelektrik enerjisi (66,19 TWh), güneş enerjisi (3,11 TWh) ve biyoenerji ile diğer yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerji (11,70 TWh) şeklindedir (Our World in Data, 2024f; Our World in Data, 2024m). Bu durum, İsveç'te fosil enerji kullanımının yıllar içinde önemli ölçüde azalmış olmasına rağmen, halen karbon emisyonları üzerinde en belirleyici unsur olduğunu göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki yüksek payına karşın, özellikle hidroelektrik ve rüzgâr enerjisinin yaygın kullanımı, emisyonları baskılayıcı etkide bulunsa da model sonuçlarında bu etkinin sınırlı düzeyde pozitif yansıması, geçiş sürecinin etkilerinin tam anlamıyla ortaya çıkmamış olabileceğine işaret etmektedir. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %46,6'dan %82,7'ye yükselmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu %36,1'lik artış, İsveç'in net gömülü CO₂ ithalatçısı konumunun belirgin biçimde güçlendiğini ve yerli üretimden kaynaklanan emisyon yükünün dış kaynaklara kaydırıldığını göstermektedir. Dolayısıyla, analiz sonucunda dış ticaret değişkeninin emisyonlar üzerinde azaltıcı bir etki göstermesi beklenirken, uzun dönemli verilerin (1991-2023) kullanılması ve süreç içerisinde farklı ekonomik ve ticari dinamiklerin devreye girmesi nedeniyle çok sınırlı da olsa artırıcı etkisi (0.0111) ortaya çıkmıştır. Benzer şekilde doğrudan yabancı yatırımların da kişi başına emisyonlar üzerinde pozitif yönde ve oldukça sınırlı (0.0072) bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu etki düzeyi, İsveç'te DYY'lerin görece düşük karbon yoğunluklu veya daha çevreci sektörlerde yoğunlaşmış olabileceğine işaret etmektedir. Nitekim 1991-2023 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı yalnızca %2,32'den %3,93'e yükselmiş ve %1,61'lik bir artış göstermiştir (Our World in Data, 2024h). Bu sınırlı artış, İsveç'e yönelen doğrudan yabancı yatırımların büyük ölçüde yüksek emisyon etkisine sahip sektörlerde yoğunlaşmadığını, aksine daha yenilikçi, enerji verimliliği yüksek veya çevre dostu faaliyetlere yönelmiş olabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, analiz sonucunda elde edilen oldukça düşük pozitif etkinin, DYY'lerin çevresel etkilerinin görece sınırlı olduğunu ortaya koyduğu söylenebilir.

Öte yandan $\ln(\text{GSYİH})$ ve $\ln(\text{KENT})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ 'de sırasıyla (-0.1035) ve (-0.13) standart sapmalık azalışa

yol açmaktadır. Ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991–2022 yılları arasında %95 oranında artış gösterirken, kişi başına CO₂ emisyonları %35 ve tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları %19 oranında azalmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu durum, ekonomik büyümenin daha düşük karbon yoğunluklu sektörler üzerinden gerçekleşmiş olabileceğini veya çevre dostu teknolojilerin yaygınlaştığını göstermektedir. 2023 yılı itibarıyla ülkedeki kentleşme oranı %87,6'dır (Our World in Data, 2024i). Kentleşmenin negatif etkisi (-0.13), şehirleşme süreçlerinin sürdürülebilir altyapı, düşük karbonlu ulaşım sistemleri ve çevreci kentsel politikalarla destekleniyor olabileceğini düşündürmektedir. Nitekim ülkede sürdürülebilir kentleşmenin sağlanması için Smart City Sweden, SymbioCity Yaklaşımı ve Bo01-Malmö Şehrinin Sürdürülebilir Mahallesi gibi uygulamalar mevcuttur (Ranhagen ve Groth, 2012; Austin, 2013; Vassileva vd., 2016). Bu uygulamalar ise analiz sonucunda elde edilen kentleşme değişkeninin kişi başına CO₂ emisyonları üzerindeki azaltıcı etkisini açıklar niteliktedir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (0.0104) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen ln(CO₂) değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak İsveç'te karbon emisyonlarını en fazla artıran değişkenin fosil enerji tüketimi olduğu görülmektedir. Yenilenebilir enerji kullanımı, dış ticaret ve doğrudan yabancı yatırımlar ise pozitif yönlü etkiler sunsa da bu etkiler oldukça sınırlı düzeydedir. Buna karşın, ekonomik büyüme ve kentleşme değişkenleri emisyonları azaltıcı yönde etki göstermektedir. Özellikle ekonomik büyümenin negatif yönlü etkisi, İsveç'in kalkınma sürecinde düşük karbonlu üretim ve enerji verimliliği odaklı bir yapı benimsediğini ortaya koymaktadır. Kentleşmenin azaltıcı etkisi ise sürdürülebilir şehircilik uygulamalarının ülkedeki rolüne işaret etmektedir. İsveç için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.33'te sunulmuştur.

Tablo 4.33. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: İsviçre

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0047	Negatif
ln(YET)	-0.0471	Negatif
ln(FET)	1.0425	Pozitif
ln(DT)	-0.0977	Negatif
ln(DYY)	-0.0754	Negatif
ln(GSYİH)	0.0278	Pozitif
ln(KENT)	0.0249	Pozitif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9836
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0243
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0303
Görelî Mutlak Hata (RAE)		16.4307 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		17.7281 %

Tablo 4.33'e göre, modelin MAE (0.0243) ve RMSE (0.0303) değerlerinin düşük olması, modelin hata seviyesinin makul düzeyde olduğunu göstermektedir. RAE (%16.4307) ve RRSE (%17.7281) değerlerinin nispeten düşük olması, modelin tahmin performansının başarılı olduğunu göstermektedir. Korelasyon katsayısının (0.9836) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

İsviçre'de ln(FET), ln(GSYİH) ve ln(KENT) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla (1.0425), (0.0278) ve (0.0249) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. İsviçre'de kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimi olmuştur. 2023 yılı itibarıyla fosil enerji tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %43,19'dur (Our World in Data, 2024f). 2023 yılı itibarıyla fosil enerji tüketiminin birincil enerji içerisindeki payının %43,19 seviyesinde kalması, ülkenin enerji üretiminde yenilenebilir kaynaklara geçiş sürecini henüz tamamlayamadığını göstermektedir. Ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %70 oranında artış gösterirken, kişi başına CO₂ emisyonları ise %29 azalmakta, tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %38 oranında artış göstermiştir (Our World in Data, 2024k). Bu durum, üretim temelli emisyonlarda düşüş yaşansa da tüketim kalıplarının karbon yoğun ürün ve hizmetlere yönelmiş olabileceğini işaret etmektedir. İsviçre'de 2023 yılında kentleşme oranı %76,4'tür (Our World in Data, 2024i). Ülkede 1990-2020 yılları arasında

kentleşmenin CO₂ emisyonlarını artıran en önemli faktör kentleşmenin beraberinde getirdiği ulaşım sektörüdür. Ulaşım sektöründen kaynaklı emisyonları ülkedeki toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %32'sini oluşturmaktadır. (Desthieux ve Joerin, 2022). 2022 yılı inşaat sektöründen kaynaklı emisyonları ise ülkedeki toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %22,6'sını meydana getirmektedir (Wüest Partner, 2024). Özellikle ulaşım ve inşaat sektörlerindeki artan faaliyetlere bağlı olarak ülkedeki CO₂ emisyonlarındaki yükseliş, analiz sonucu elde edilen İsviçre'deki kentleşme değişkeninin kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı etkisini (0.0249) açıklamaktadır.

Öte yandan $\ln(\text{YET})$, $\ln(\text{DT})$ ve $\ln(\text{DYY})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ 'de sırasıyla (-0.0471), (-0.0977) ve (-0.0754) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. Ülkenin birincil enerji tüketimi içerisinde yenilenebilir enerji tüketimi payı 1991 yılından 2023 yılına kadar %36 oranında artış göstermiştir (Our World in Data, 2024j). Buna rağmen, yenilenebilir enerji tüketiminin karbon emisyonları üzerindeki etkisinin görece sınırlı kalması, enerji dönüşüm sürecinin henüz tam anlamıyla olgunlaşmadığını ve fosil yakıtların enerji sistemindeki varlığının devam ettiğini göstermektedir. Ancak yine de yenilenebilir enerji kullanımındaki bu %36'lık artış, uzun vadede emisyonları azaltma potansiyeline sahip önemli bir gelişme olarak değerlendirilebilir. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %91'den %271,7'ye yükselerek, %180,7'lik ciddi bir artış meydana gelmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu %180,7'lik artış, İsviçre'nin net gömülü karbon ithalatçısı konumunu pekiştirdiğini göstermektedir. Bu doğrultuda, dış ticaretin modele göre emisyon azaltıcı etki (-0.0977) yaratması; İsviçre'deki üretim faaliyetlerinin düşük karbon yoğunluğuna sahip olması ve yüksek emisyonlu üretimin büyük oranda dış kaynaklardan sağlanmasıyla açıklanabilir. Doğrudan yabancı yatırımların emisyonları azaltıcı yönde etkisi (-0.0754) ise ülkede yatırım girişlerinin daha az enerji yoğun sektörlerle yönelmiş olabileceğini ima etmektedir. Nitekim 2023 yılında İsviçre'ye yönelik doğrudan yabancı yatırımların %42,5'i finans ve sigorta sektörüne gerçekleştirilmiştir (Lloyds Bank Trade, 2025c). Ülkede son yıllarda özellikle doğrudan yabancı yatırımların ağırlıklı olarak düşük karbon yoğunluklu sektörlerle yönelik gerçekleşmesi, analiz sonucundaki azaltıcı etkinin göstergesi niteliğindedir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.0047) tüm bağımsız

değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen $\ln(\text{CO}_2)$ değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak İsviçre’de kişi başına düşen karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimi olmuştur. Ekonomik büyüme ve kentleşme değişkenleri de artış yönlü etkide bulunsa da bu etkiler oldukça sınırlı düzeydedir. Buna karşılık, yenilenebilir enerji tüketimi, dış ticaret ve doğrudan yabancı yatırımlar emisyonlar üzerinde azaltıcı etki yaratmaktadır. Özellikle dış ticaretin görece güçlü azaltıcı etkisi, İsviçre’nin düşük karbon ayak izine sahip ticaret yapısına sahip olabileceğini düşündürmektedir. Macaristan için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.34’te sunulmuştur.

Tablo 4.34. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Macaristan

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0209	Negatif
$\ln(\text{YET})$	-0.3229	Negatif
$\ln(\text{FET})$	0.6819	Pozitif
$\ln(\text{DT})$	-0.22	Negatif
$\ln(\text{DYY})$	-0.0027	Negatif
$\ln(\text{GSYİH})$	0.1232	Pozitif
$\ln(\text{KENT})$	-0.0548	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9841
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0147
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0192
Görelî Mutlak Hata (RAE)		14.5394 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		17.4933 %

Tablo 4.34’e göre, modelin MAE (0.0147) ve RMSE (0.0192) değerlerinin düşük olması, modelin hata seviyesinin makul düzeyde olduğunu göstermektedir. RAE (%14.5394) ve RRSE (%17.4933) değerlerinin de kabul edilebilir düzeyde olması, modelin tahmin performansının genel olarak başarılı olduğunu göstermektedir. Korelasyon katsayısının (0.9841) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

Macaristan’da $\ln(\text{FET})$ ve $\ln(\text{GSYİH})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ ’de sırasıyla (0.6819) ve (0.1232) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Macaristan’da kişi başına düşen karbon emisyonlarını en fazla

artıran değişken fosil enerji tüketimi olmuştur. Ülkede 2023 yılı itibarıyla fosil enerji tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %73,33'tür (Our World in Data, 2024f). Bu oran, yenilenebilir kaynaklara geçiş sürecinin yavaş ilerlediğini ve enerji üretiminin büyük ölçüde karbon yoğun sistemlerle göstermektedir. Analiz sonucu emisyonları artırıcı etkiye (0.1232) sahip olan diğer değişken ise ekonomik büyümedir. Ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %100 oranında artış gösterirken, kişi başına CO₂ emisyonları ise %36 ve tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %25 oranında azalmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu durum, ekonomik büyümenin kişi başına CO₂ emisyonlarında azalmaya yol açmasına rağmen halen aynı oranda bir azalış sergilenmediğini göstermekte ve analizde ekonomik büyümenin emisyonlar üzerinde artırıcı bir etkiye sahip olduğuna dair elde edilen bulgularla da tutarlılık arz etmektedir.

Öte yandan ln(YET), ln(DT), ln(DYY) ve ln(KENT) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalı değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla (-0.3229), (-0.22), (-0.0027) ve (-0.0548) standart sapmalı azalışa yol açmaktadır. Bu durum, Macaristan'da karbon emisyonlarını azaltmada özellikle yenilenebilir enerji kullanımı ve dış ticaretin görece belirgin bir rol oynadığını göstermektedir. 2023 yılında toplam elektrik üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen oran %26,4'tür (Our World in Data, 2025f). Bu oran, enerji sisteminde yenilenebilir kaynakların artan payını yansıtmakta olup, emisyonları azaltıcı yönde etkide bulunmuştur. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %20'den %40'a yükselerek, %20'lik bir artış göstermiştir (Our World in Data, 2024g). Bu artış Macaristan'ın gömülü net CO₂ ithalatçısı konumuna geçişini ortaya koymaktadır. Analiz sonucu elde edilen kısmi azalma ise üretim kaynaklı emisyonların bir kısmının dış kaynaklara kaydırılması yoluyla yerli karbon baskısının azaltılması sonucu olduğunu işaret etmektedir. Ülkede 1991-2023 yılları arasında doğrudan yabancı yatırımların GSYİH'ye oranı %4,21'den %-34,01'e düşerek, %38,22'lik kayda değer bir azalış sergilemiştir (Our World in Data, 2024h). DYY'deki bu istikrarsızlık, ekonomik yapıda yabancı sermayenin sınırlı bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla modelde emisyonlar üzerindeki azaltıcı etkinin düşük kalması, büyük ölçüde bu olumsuz sermaye hareketleriyle ilişkilendirilebilir. Macaristan'da 2023 yılı itibarıyla kentleşme oranı ise %72,4'tür (Our World in Data, 2024i). Ülkede sürdürülebilir kentleşmenin sağlanması için Smart

Budapest 2030 Stratejisi ve MOL Bubi Bisiklet Paylaşım Sistemi gibi çeşitli uygulamalar mevcuttur (Górka, 2024; Szabó ve Gupta, 2020). Analiz sonucunda elde edilen kentleşme değişkeninin kişi başına CO₂ emisyonları azaltıcı etkisi (-0.0548) ise ülkede bu tür uygulamaların yürütülmesi ile örtüşmekte, ülkede sürdürülebilir kentleşme politikaları ile emisyonlar üzerinde olumlu sonuçların alınabileceği görülmektedir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.0209) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen ln(CO₂) değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak Macaristan'da karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimi olmuştur. Ekonomik büyüme de emisyonları artırıcı yönde etki göstermekte ancak bu etki sınırlı düzeydedir. Buna karşılık, yenilenebilir enerji tüketimi ve dış ticaret değişkenleri en belirgin azaltıcı etkiye sahip olup, doğrudan yabancı yatırımlar ve kentleşme de emisyonları sınırlı düzeyde azaltmaktadır. Bu bulgular, ülkenin enerji sisteminde dönüşüm çabalarının ve daha çevreci dış ticaret ilişkilerinin emisyon azaltımına katkı sunduğunu göstermektedir. Küme 2 ülkeleri için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları özet olarak Tablo 4.35'te sunulmuştur.

Tablo 4.35. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Küme 2 Özet Tablosu

Ülke	ln(YET)	ln(FET)	ln(DT)	ln(DYY)	ln(GSYİH)	ln(KENT)
Çin	-0.0575	0.9303	-0.0547	0.0165	0.2212	-0.0646
	<i>R: 0.9989, MAE: 0.0181, RMSE: 0.0238, RAE: 3.8103 %, RRSE: 4.625 %</i>					
İspanya	-0.0727	0.8844	-0.0588	0.0168	-0.072	-0.1005
	<i>R: 0.9856, MAE: 0.0228, RMSE: 0.0294, RAE: 15.6726 %, RRSE: 16.4579 %</i>					
İtalya	-0.003	0.715	-0.0008	0.0244	0.1016	-0.3095
	<i>R: 0.9904, MAE: 0.0191, RMSE: 0.0227, RAE: 12.6205 %, RRSE: 13.3494 %</i>					
Yunanistan	0.0397	0.8989	-0.0851	-0.0294	-0.0968	-0.178
	<i>R: 0.9857, MAE: 0.0265, RMSE: 0.0338, RAE: 15.4511 %, RRSE: 16.3707 %</i>					
Fransa	-0.074	0.7628	0.0717	0.0024	-0.0583	-0.2362
	<i>R: 0.9932, MAE: 0.0135, RMSE: 0.0179, RAE: 10.083 %, RRSE: 11.6823 %</i>					
İsveç	0.0079	0.7731	0.0111	0.0072	-0.1035	-0.13
	<i>R: 0.9957, MAE: 0.0185, RMSE: 0.0232, RAE: 8.0199 %, RRSE: 8.9762 %</i>					
İsviçre	-0.0471	1.0425	-0.0977	-0.0754	0.0278	0.0249
	<i>R: 0.9836, MAE: 0.0243, RMSE: 0.0303, RAE: 16.4307 %, RRSE: 17.7281 %</i>					
Macaristan	-0.3229	0.6819	-0.22	-0.0027	0.1232	-0.0548
	<i>R: 0.9841, MAE: 0.0147, RMSE: 0.0192, RAE: 14.5394 %, RRSE: 17.4933 %</i>					

Tablo 4.35'e göre, Küme 2 ülkelerinde kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimidir. Özellikle İsviçre (1.0425), Çin (0.9303), Yunanistan (0.8989) ve İspanya (0.8844) gibi ülkelerde bu etkinin oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, söz konusu ülkelerde fosil yakıtların enerji üretiminde hâlâ baskın bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Yenilenebilir enerji tüketimi değişkeni ise çoğu ülkede emisyonları azaltıcı yönde etki göstermiştir. En belirgin azalış Macaristan'da (-0.3229) görülürken; İsviçre (-0.0471) ve Fransa (-0.074) gibi ülkelerde de sınırlı azaltıcı etkiler kaydedilmiştir. Ancak Yunanistan (0.0397) ve İsveç (0.0079) gibi ülkelerde bu değişkenin pozitif etkisi dikkat çekmektedir, bu da geçiş sürecinin emisyonları baskılamada yeterli olmadığını düşündürmektedir.

Kentleşme değişkeni ise genel olarak karbon emisyonlarını azaltıcı yönde etki göstermiştir. İtalya (-0.3095), Fransa (-0.2362) ve Yunanistan (-0.178) gibi ülkelerde bu etki güçlüdür. Ancak İsviçre'de (0.0249) pozitif yönlü bir etki olması, kentleşmenin yapısına göre farklı sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir.

Dış ticaret değişkeni birçok ülkede emisyonları azaltıcı etkide bulunmuştur. En yüksek azaltıcı etki Macaristan'da (-0.22) kaydedilmiştir. Ancak Fransa (0.0717) ve İsveç (0.0111) gibi ülkelerde dış ticaretin emisyonları artırıcı etkisi dikkat çekmektedir.

Doğrudan yabancı yatırımların etkisi genellikle oldukça sınırlıdır. Bu değişken bazı ülkelerde (Macaristan (-0.0027), Yunanistan(-0.0294)) emisyonları çok sınırlı düzeyde azaltırken, Çin (0.0165) gibi ülkelerde ise küçük bir artış yönlü etki yaratmaktadır.

Ekonomik büyüme değişkeni ise karmaşık sonuçlar sunmaktadır. Çin (0.2212), Macaristan (0.1232) ve İtalya (0.1016) gibi ülkelerde büyüme emisyonları artırıcı yönde etkili olurken; Fransa (-0.0583) ve İspanya (-0.072) gibi ülkelerde azaltıcı etki göstermektedir. Bu durum, büyümenin karbon yoğunluğu düşük sektörlerle gerçekleştiği ekonomilerde çevresel etkilerin daha sınırlı olabileceğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak Küme 2 ülkelerinde kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken açık ara fosil enerji tüketimidir. Özellikle İsviçre, Çin, Yunanistan ve İspanya gibi ülkelerde bu etkinin yüksek olduğu görülmektedir. Buna karşın,

emisyonları azaltıcı yönde en yaygın ve baskın etkiye sahip değişken ise kentleşmedir. İtalya, Fransa ve Yunanistan gibi ülkelerde kentleşme, CO₂ emisyonlarını belirgin ölçüde azaltmıştır. Yenilenebilir enerji tüketimi ve dış ticaret değişkenleri de birçok ülkede emisyonları azaltıcı etki göstermektedir; ancak bu etkiler daha sınırlı düzeyde kalmakta ve ülkelere göre farklılık göstermektedir. Ekonomik büyümenin etkisi ise karmaşık olup bazı ülkelerde artırıcı, bazı ülkelerde azaltıcı yönde sonuçlar vermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, bu kümede fosil yakıta bağımlılık emisyon artışının temel belirleyicisi olurken; kentleşme, yenilenebilir enerji kullanımı ve dış ticaret gibi faktörler ise çeşitli ülkelerde emisyonları azaltma potansiyeli taşımaktadır.

Küme 3 Ülkeleri için DVR Bulguları

X-Means algoritması kullanılarak gerçekleştirilen kümeleme analizi sonucunda, Küme 2’de Arjantin, Brezilya, Endonezya, Fas, Meksika, Mısır, Şili, Türkiye ve Hindistan ülkeleri tespit edilmiştir. Arjantin için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.36’da sunulmuştur.

Tablo 4.36. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Arjantin

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0176	Negatif
ln(YET)	- 0.1478	Negatif
ln(FET)	0.696	Pozitif
ln(DT)	0.2252	Pozitif
ln(DYY)	- 0.0096	Negatif
ln(GSYİH)	0.2814	Pozitif
ln(KENT)	- 0.045	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9796
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0174
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0239
Görelî Mutlak Hata (RAE)		17.0604 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		20.4439 %

Tablo 4.36’ya göre, modelin MAE (0.0174) ve RMSE (0.0239) değerlerinin düşük olması, modelin hata seviyesinin makul düzeyde olduğunu göstermektedir. RAE (%17.0604) ve RRSE (%20.4439) değerlerinin de kabul edilebilir düzeyde olması, modelin tahmin performansının genel olarak başarılı olduğunu göstermektedir.

Korelasyon katsayısının (0.9796) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

Arjantin’de $\ln(\text{FET})$, $\ln(\text{DT})$ ve $\ln(\text{GSYİH})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ ’de sırasıyla (0.696), (0.2252) ve (0.2814) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Fosil enerji tüketimi Arjantin’de karbon emisyonlarını artıran en güçlü belirleyicidir. Nitekim Arjantin’in 2023 yılı itibarıyla fosil enerji tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %83,71’dir (Our World in Data, 2024f). Bu oranda analiz sonucunu destekler nitelikte olup, ülkenin ülkenin fosil kaynaklara olan bağımlılığının yüksek olduğunu ortaya koymakta ve bu nedenle de oluşabilecek CO_2 emisyonlarına zemin hazırlamaktadır. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO_2 emisyonlarına oranı, %3,1’den %-4,4’e düşerek, %5,1’lik bir azalış meydana gelmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu azalış, Arjantin’in net gömülü karbon ihracatçısı konumuna geçtiğini ve analiz sonucundaki artırıcı etkisini destekler niteliktedir. Ülkenin kişi başına GSYİH’si 1991-2022 yılları arasında %106 oranında artış gösterirken, kişi başına CO_2 emisyonları ise %73 ve tüketim temelli kişi başına CO_2 emisyonları ise %61 oranında artmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu artış, ekonomik büyümenin yüksek oranda enerji ve karbon yoğun sektörler üzerinden gerçekleştiğini ve çevreci teknolojilerin yeterince yaygınlaşmadığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, ekonomik büyümenin emisyonlar üzerindeki güçlü artırıcı etkisi (0.2814), üretim yapısının düşük karbonlu dönüşüme henüz geçmediğini göstermektedir.

Öte yandan $\ln(\text{YET})$, $\ln(\text{DYY})$ ve $\ln(\text{KENT})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ ’de sırasıyla (-0.1478), (-0.0096) ve (-0.045) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. Bu durum, yenilenebilir enerji tüketiminin Arjantin’de karbon emisyonlarını azaltıcı bir rol oynadığını ve temiz enerji kaynaklarının çevresel sürdürülebilirlik açısından önemini ortaya koymaktadır. Arjantin’de toplam elektrik enerjisi üretiminin 2023 yılı itibarıyla %34,1’i yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmektedir (Our World in Data, 2024l). Bu oran, yenilenebilir enerjinin toplam elektrik üretimi içerisindeki payının henüz sınırlı olduğunu göstermesine rağmen; analiz sonucuna göre emisyonlar üzerinde azaltıcı bir etki yaratması, payının artırılması durumunda bu etkinin daha da belirginleşebileceğini işaret etmektedir. Ülkede 1991-2023 yılları arasında DYY’nin GSYİH’ye oranı

%1,29'dan %3,69'a yükselerek, %2,40'lık bir artış sergilemiştir (Our World in Data, 2024h). Bu artışa rağmen, modelde DYY değişkeninin emisyonlar üzerindeki etkisinin oldukça düşük düzeyde kalması (-0.0096), yabancı yatırımların çevreye duyarlı sektörlerde yoğunlaşmadığını veya genel ekonomi içindeki etkisinin sınırlı olduğunu düşündürmektedir. Ülkede 2023 yılında kentleşme oranı %94,5'tir (Our World in Data, 2024i). Kentleşmenin emisyonlar üzerinde kısıtlı bir azaltıcı etkiye sahip olması (-0.045), ülkede şehirleşme süreçlerinin çevresel sürdürülebilirliğe yönelik adımlar atıldığını göstermektedir. Nitekim Arjantin'de sürdürülebilir kentleşme adına Green Buenos Aires Plan, yeşil koridor projeleri, Smart Cities stratejileri ve EcoBici uygulamalarının yanı sıra, Barrio 20 Urban Lab projesi gibi kentsel dönüşüm laboratuvarı niteliğinde girişimler mevcut olması bu duruma örnek teşkil etmektedir (Heinonen vd., 2016; Hudson vd., 2019; Redondo Bermudez vd., 2022; Guerra vd., 2025). Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.0176) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen $\ln(\text{CO}_2)$ değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak Arjantin'de karbon emisyonlarını en fazla artıran değişkenin fosil enerji tüketimi olduğu görülmektedir. Öte yandan, yenilenebilir enerji tüketimi ve kentleşme emisyonları azaltıcı yönde etkilerken; doğrudan yabancı yatırımların etkisi sınırlı düzeyde azalış sergilemektedir. Brezilya için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.37'de sunulmuştur.

Tablo 4.37. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Brezilya

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0041	Negatif
ln(YET)	0.1391	Pozitif
ln(FET)	0.9908	Pozitif
ln(DT)	0.0089	Pozitif
ln(DYY)	0.0494	Pozitif
ln(GSYİH)	0.019	Pozitif
ln(KENT)	-0.2057	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9918
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0153
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0189
Görelî Mutlak Hata (RAE)		12.1857 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		12.4182 %

Tablo 4.37'ye göre, modelin MAE (0.0153) ve RMSE (0.0189) değerlerinin düşük olması modelin hata seviyesinin makul düzeyde olduğunu göstermektedir. RAE (%12.1857) ve RRSE (%12.4182) değerlerinin de düşük olması, modelin tahmin performansının başarılı olduğunu göstermektedir. Korelasyon katsayısının (0.9918) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

Brezilya'da ln(YET), ln(FET), ln(DT), ln(DYY) ve ln(GSYİH) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla pozitif yönlü (0.1391), (0.9908), (0.0089), (0.0494) ve (0.019) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Brezilya'da karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimi olup, bu durum ülkenin enerji üretiminde fosil kaynakların ağırlıklı olduğunu göstermektedir. Yenilenebilir enerji tüketiminin emisyonları artırıcı yönde etkisi, bu kaynakların yeterince verimli ya da yaygın kullanılmadığını düşündürmektedir. Nitekim Brezilya'nın 2023 yılı itibarıyla fosil enerji tüketiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %48,73'tür. 2023 yılında yenilenebilir enerjinin elektrik enerjisi üretimi içindeki payı %88,9'dur. Elektrik enerjisi üretimi için kullanılan yenilenebilir enerji miktarları ise; rüzgâr enerjisi (95,51 TWh), hidroelektrik enerjisi (428,65 TWh), güneş enerjisi (51,48 TWh) ve biyoenerji ile diğer yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerji (55,83 TWh) şeklindedir (Our World in Data, 2024f; Our World in Data, 2024l; Our World in Data, 2024m). Bu değerlere göre Brezilya'da

elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının oldukça yüksek bir paya (%88,9) sahip olduğu görülmektedir. Ancak, fosil enerji tüketiminin birincil enerji tüketimindeki payının hâlâ %48,73 seviyesinde olması, fosil yakıtların enerji sistemindeki ağırlığını koruduğunu göstermektedir. Yenilenebilir enerji tüketiminin emisyonları artırıcı yönde bir etki göstermesi ise bu kaynakların enerji sistemine entegrasyonunun henüz yeterli düzeyde sağlanamadığına işaret etmektedir. Özellikle hidroelektrik ve biyoenerji gibi kaynakların çevresel sürdürülebilirlik açısından bazı sınırlılıkları bulunabilir. Bu durum, yenilenebilir enerji üretiminin yüksek olmasına rağmen, ulaşım, sanayi ve ısıtma gibi diğer enerji kullanım alanlarında fosil yakıtların yaygın biçimde kullanılmaya devam ettiğini göstermektedir. Dolayısıyla, emisyonların azaltılabilmesi için yenilenebilir enerji kullanımının yalnızca elektrik üretiminde değil, enerji tüketiminin tüm sektörlerinde yaygınlaştırılması ve verimli biçimde uygulanması gerekmektedir.

Bununla birlikte, 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %9,7'den %-5,3'e düşerek, %15'lik bir azalış meydana gelmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu azalma, Brezilya'nın zamanla daha fazla karbon içeren ürün ihracatı yaptığı ve buna karşılık daha az karbon yoğun ithalat gerçekleştirdiği anlamına gelmektedir. Bu durum, ülkenin üretim temelli emisyon yükünün artmasına yol açabileceği gibi, modelde dış ticaretin emisyon artırıcı etkisini (0.0089) de desteklemektedir. Ülkede 1991-2023 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı %0,32'den %2,95'e yükselerek, %2,63'lük artış sergilemiştir (Our World in Data, 2024h). Analiz sonucu DYY değişkeninin karbon emisyonları üzerindeki etkisinin sınırlı düzeyde pozitif (0.0494) olması, yatırımların çevresel etkisinin doğrudan olmadığı veya yatırım alanlarının emisyon yoğun sektörlerle sınırlı olabileceğini düşündürmektedir. Ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %105 oranında artış gösterirken, kişi başına CO₂ emisyonları ise %111, tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %82 oranında artış göstermiştir (Our World in Data, 2024k). Bu bulgular, ekonomik büyümenin (0.019) karbon emisyonlarını artırıcı etkisini desteklemektedir. Büyüme sürecinde enerji yoğun sektörlerin ve fosil yakıt kullanımının ağırlığının sürmesi, bu etkinin arka planını oluşturabilir.

Öte yandan ln(KENT) değişkeninde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, ln(CO₂)'de (-0.2057) standart sapmalılık azalışa yol açmaktadır. Brezilya'nın 2023 yılı

kentleşme oranı %89,2 olup oldukça yüksektir (Our World in Data, 2024i). Brezilya’da sürdürülebilir kentleşme kapsamında hızlı otobüs taşımacılığı sistemi (Bus Rapid Transit- BRT) ve dirençli şehirler ağı (Resilient Cities Network-RCN) gibi çeşitli uygulamalar yürütülmektedir (Prestes vd., 2022; Silva vd., 2022). Dolayısıyla kentleşmenin emisyonları azaltıcı yönde etkide bulunması, çevre dostu kentsel politikaların etkili biçimde uygulandığını göstermektedir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.0041) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen $\ln(\text{CO}_2)$ değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak Brezilya’da karbon emisyonlarındaki artış üzerinde en etkili değişken fosil enerji tüketimidir. Bu durum, fosil yakıtların ülkenin enerji yapısında hâlâ önemli bir yer tuttuğunu göstermektedir. Yenilenebilir enerji tüketiminin sınırlı da olsa artırıcı yönde etkisi, bu kaynakların enerji sistemine entegrasyonunun istenen düzeye ulaşmadığını düşündürmektedir. Dış ticaret, doğrudan yabancı yatırımlar ve ekonomik büyüme değişkenlerinin etkileri ise daha düşük düzeyde olmakla birlikte artış yönündedir. Öte yandan, kentleşmenin emisyonları azaltıcı yönde etkili olması, şehirleşme sürecinde uygulanan bazı çevresel yaklaşımların olumlu sonuçlar doğurabileceğini işaret etmektedir. Endonezya için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.38’de sunulmuştur.

Tablo 4.38. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Endonezya

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0353	Negatif
$\ln(\text{YET})$	-0.0328	Negatif
$\ln(\text{FET})$	0.4263	Pozitif
$\ln(\text{DT})$	0.1009	Pozitif
$\ln(\text{DYY})$	0.0222	Pozitif
$\ln(\text{GSYİH})$	0.2717	Pozitif
$\ln(\text{KENT})$	0.3735	Pozitif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9828
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0383
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0497
Görelî Mutlak Hata (RAE)		17.4373 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		18.6304 %

Tablo 4.38'e göre, modelin MAE (0.0383) ve RMSE (0.0497) değerlerinin makul seviyelerde olması, modelin hata seviyesinin kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. RAE (%17.4373) ve RRSE (%18.6304) değerleri nispeten yüksek olsa da korelasyon katsayısının (0.9828) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

Endonezya'da $\ln(\text{FET})$, $\ln(\text{DT})$, $\ln(\text{DYY})$, $\ln(\text{GSYİH})$ ve $\ln(\text{KENT})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ 'de sırasıyla (0.4263), (0.1009), (0.0222), (0.2717) ve (0.3735) standart sapmalılık artışa neden olmaktadır. Endonezya'da karbon emisyonlarını en fazla artıran değişkenlerin başında fosil enerji tüketimi ve kentleşme gelmektedir. Bu durum, ülkenin enerji altyapısında kömür ve petrol gibi fosil yakıtların yaygın kullanımının sürdüğünü ve hızlı kentleşmenin çevresel etkilerinin yönetilmekte zorlanıldığını göstermektedir. Nitekim ülkenin 2023 yılında fosil enerji tüketim miktarı 2.514,42 TWh; fosil enerji üretiminin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı ise %89,55 olması bu sonucu desteklemektedir (Our World in Data, 2024f; Our World in Data, 2024n). Ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %289 oranında artış gösterirken, kişi başına CO_2 emisyonları ise %322, tüketim temelli kişi başına CO_2 emisyonları ise %346 oranında artmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu durum, ekonomik büyümenin oldukça hızlı gerçekleştiğini ancak büyümenin karbon yoğun sektörler üzerinden ilerlediğini göstermektedir. GSYİH'deki artışın emisyonlardaki daha da büyük artışlarla eşlik etmesi, büyümenin çevresel sürdürülebilirlikten uzak olduğunu düşündürmektedir. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO_2 emisyonlarına oranı %-8,4'ten %-3,2'ye yükselerek, %5,2'lik bir artış meydana gelmiştir (Our World in Data, 2024g). Endonezya'nın gömülü karbon açısından bir net gömülü karbon ihracatçı olma konumunda olduğu görülmekte ve ihracatçı konumu ise analiz sonucundaki dış ticaretin CO_2 emisyonları üzerine artırıcı etkisini (0.1009) desteklemektedir. Ülkede 1991-2023 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı %1,27'den %1,61'e yükselerek, %0,34'lük artış sergilemiştir (Our World in Data, 2024h). Ülkede doğrudan yabancı yatırımların GSYİH içindeki payı oldukça kısıtlıdır. Bununla birlikte ülkede analiz sonucunda doğrudan yabancı yatırımların kişi başına CO_2 emisyonları üzerindeki etkisinin düşük düzeyde ve pozitif yönlü (0.0222) olması, gelen yatırımların büyük ölçüde çevresel etkisi düşük veya nötr sektörlerde yoğunlaştığını ya da yatırım

hacminin henüz sınırlı kaldığını göstermektedir. 2023 yılı ülkenin kentleşme oranı %52,5'tür ve kentleşme değişkeni (0.3735) ülkede kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı etkiye sahip olan bir diğer değişkendir. Bu sonuç Endonezya'da kentsel nüfus artışının CO₂ salımlarını artırdığını ortaya koyan Prastiyo vd. (2020) ile Nihayah vd. (2022) çalışmalarının bulgularıyla örtüşmektedir. Ayrıca ülkede ulaşım sektörü CO₂ emisyonlarının başlıca kaynağıdır ve 2023 yılında toplam emisyonlarının %22'sini oluşturmuştur (Asian Transport Outlook, 2024). Kentleşme oranı görece orta seviyede olmasına rağmen, ülkede kentleşmeyle artan ulaşım dayalı emisyonların yüksekliği analiz sonucundaki artırıcı etkinin bir nedeni olarak gösterilebilir.

Öte yandan ln(YET) değişkeninde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)'de (-0.0328) standart azalışa yol açmaktadır. Endonezya'nın yenilenebilir enerji üretiminin toplam birincil enerji kaynaklarından elde edilen enerji miktarı içerisindeki payı 1991 yılında %3,81 iken; 2023 yılında ise %10,45 olarak gerçekleşmiştir (Our World in Data, 2025j). Analiz sonucunda yenilenebilir enerji tüketiminin karbon emisyonlarını azaltıcı yönde etkili tespit edilmesi ile bu değerler birlikte incelendiğinde, Endonezya'nın son yıllarda temiz enerji kaynaklarına yönelik yatırımlarını artırdığını göstermektedir. Ancak bu etkinin görece sınırlı kalması, yenilenebilir enerji kullanımının henüz fosil yakıtların yerini tam anlamıyla alamadığını ve dönüşüm sürecinin erken aşamalarında olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.0353) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen ln(CO₂) değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak Endonezya'da karbon emisyonları üzerinde en belirgin artırıcı etkiyi fosil enerji tüketimi ve kentleşme oluşturmaktadır. Buna karşın, yenilenebilir enerji kullanımının emisyonları azaltıcı yöndeki sınırlı etkisi, enerji politikalarında sürdürülebilir kaynaklara geçişin henüz yeterince güçlü olmadığını göstermektedir. Bu durum hem enerji altyapısında dönüşüm ihtiyacına hem de kentleşme sürecinin çevresel açıdan daha dengeli yönetilmesi gerekliliğine işaret etmektedir. Fas için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.39'da sunulmuştur.

Tablo 4.39. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Fas

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0216	Negatif
ln(YET)	0.0054	Pozitif
ln(FET)	0.7295	Pozitif
ln(DT)	-0.0487	Negatif
ln(DYY)	0.0439	Pozitif
ln(GSYİH)	0.2054	Pozitif
ln(KENT)	0.0824	Pozitif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9923
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.023
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0281
Görelî Mutlak Hata (RAE)		11.3746 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		12.2612 %

Tablo 4.39'a göre, modelin MAE (0.023) ve RMSE (0.081) değerlerinin makul seviyelerde olması, modelin hata seviyesinin kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. RAE (%11.3746) ve RRSE (%12.2612) değerleri de düşük olup, korelasyon katsayısının (0.9923) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün oldukça yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Fas'ta ln(YET), ln(FET), ln(DYY), ln(GSYİH) ve ln(KENT) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, ln(CO₂)'de sırasıyla (0.0054), (0.7295), (0.0439), (0.2054) ve (0.0824) standart sapmalılık artışa neden olmaktadır. Fas'ta karbon emisyonlarını en güçlü şekilde artıran unsur fosil enerji tüketimidir. Bu durum, ülkenin enerji arzında hâlâ kömür ve petrol gibi kaynaklara önemli ölçüde bağımlı olduğunu göstermektedir. Nitekim Fas'ın 2023 yılı birincil enerji tüketimi içerisinde fosil enerji tüketiminin payının %91,56 olması bu yorumu destekler niteliktedir (Our World in Data, 2024f). Toplam elektrik üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edildiği oran %21,7'dir (Our World in Data, 2024l). Bu oran, yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payının sınırlı kaldığını ve enerji sisteminde fosil kaynakların hâlâ baskın olduğunu göstermektedir. Modelde yenilenebilir enerjinin CO₂ üzerindeki etkisinin pozitif yönlü olması (0.0054), bu kaynakların sistematik ve verimli biçimde entegre edilmediğini ya da kullanımının hâlâ yetersiz kaldığını düşündürmektedir. Ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %182 oranında artış gösterirken, kişi başına CO₂ emisyonları ise %193, tüketim temelli kişi

başına CO₂ emisyonları ise %131 oranında artış göstermiştir (Our World in Data, 2024k). Bu sonuçlar, ekonomik büyümenin çevresel etkisinin oldukça belirgin olduğunu göstermektedir. GSYİH'deki artışın emisyon artışını da beraberinde getirmesi, büyümenin karbon yoğun sektörler aracılığıyla gerçekleştiğini düşündürmektedir. Modelde GSYİH'nin pozitif etkisinin (0.2054) yüksek olması da bu ilişkiyi desteklemektedir. Ülkede 1991-2023 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı %0,98'den %0,76'ya gerileyerek, %0,22 azalmıştır (Our World in Data, 2024h). Doğrudan yabancı yatırımların CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi sınırlı düzeyde pozitif (0.0439)'tir. Bu durum yatırımların çevresel etkisi düşük alanlara yönelmiş olabileceğini ya da yatırım hacminin emisyonlar üzerinde belirleyici olmadığını göstermektedir. El Atmani vd. (2025) Fas'a yapılan DYY'lerin imalat ve madencilik sektörlerinde yoğunlaştığını ve bu yüzden CO₂ emisyonlarında artış gerçekleştiğini söylemekte ve bu durum analiz sonucundaki DYY değişkeninin kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı etkisinin nedenini göstermektedir. Ayrıca kentleşme de emisyonları artırıcı yönde etki göstermektedir ve ülkenin 2023 yılındaki kentleşme oranı %65,9'dur (Our World in Data, 2024i). Modelde kentleşmenin etkisinin pozitif (0.0824) olması, Fas'ta şehirleşmenin çevresel etkilerinin yeterince kontrol altına alınamadığını ve sürdürülebilir kentsel planlamaların henüz yaygınlaşmadığını ortaya koymaktadır. Nitekim Bajja vd. (2023) çalışmalarında Fas'ta kentleşmenin çevresel kalite üzerinde olumsuz etkileri olduğunu bunun nedeninin ise enerji tüketimindeki artış ve fosil yakıtla dayalı ulaşımdan kaynaklı olduğunu belirtmesi bu durumu açıklar niteliktedir.

Öte yandan $\ln(DT)$ değişkeninde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de (-0.0487) standart sapmalılık azalışa yol açmaktadır. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %29,8'den %2,0'a düşerek, %27,8'lik bir azalış meydana gelmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu düşüş, ülkenin dış ticaret yapısında karbon yoğun ürünlerin ithalatındaki azalmayı veya daha düşük karbon ayak izine sahip ticaret ortaklarıyla artan ilişkileri işaret etmektedir. Modelde dış ticaretin emisyonlar üzerindeki etkisinin negatif çıkması da bu dönüşümü desteklemektedir. Bu durum, dış ticaretin ülkenin toplam emisyon yükünü azaltan bir unsur hâline gelmeye başladığını göstermektedir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (-0.0216) tüm

bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen $\ln(\text{CO}_2)$ değeriinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak Fas'ta karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimidir. Bunu ekonomik büyüme ve kentleşme takip etmektedir. Yenilenebilir enerji ve doğrudan yabancı yatırımların etkisi ise daha sınırlı düzeydedir. Öte yandan, dış ticaret emisyonları azaltıcı yönde etkileyen tek değişken olarak öne çıkmaktadır. Meksika için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.40'ta sunulmuştur.

Tablo 4.40. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Meksika

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0308	Pozitif
$\ln(\text{YET})$	-0.2224	Negatif
$\ln(\text{FET})$	0.7249	Pozitif
$\ln(\text{DT})$	0.2307	Pozitif
$\ln(\text{DYY})$	-0.0082	Negatif
$\ln(\text{GSYİH})$	0.5002	Pozitif
$\ln(\text{KENT})$	-0.8006	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9595
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0133
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0184
Görelî Mutlak Hata (RAE)		23.7731 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		27.6166 %

Tablo 4.40'a göre, modelin MAE (0.0133) ve RMSE (0.0184) değerlerinin makul düzeylerde olması, tahminlerin genel olarak başarılı ve hata seviyesinin kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. RAE (%23.7731) ve RRSE (%27.6166) değerleri diğer ülkelere kıyasla bir miktar daha yüksek çıkmış olsa da modelin tutarlılığını büyük ölçüde koruduğu söylenebilir. Ayrıca, korelasyon katsayısının (0.9595) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün oldukça güçlü olduğunu ortaya koymaktadır.

Meksika'da $\ln(\text{FET})$, $\ln(\text{DT})$ ve $\ln(\text{GSYİH})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ 'de sırasıyla (0.7249), (0.2307) ve (0.5002) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Meksika'da karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimi olup, ülkede 2023 yılı birincil enerji tüketimi içerisinde fosil enerji tüketiminin payının %90,08 olması bu durumu açıklar

niteliktedir (Our World in Data, 2024f). Çünkü fosil enerji bağımlılığının bu denli yüksek olması, enerji üretiminde ve tüketiminde karbon yoğun kaynakların hâlen temel rol oynadığını göstermektedir. Bu yapı, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir engel teşkil etmektedir. Ekonomik büyümenin emisyonlara olan yüksek katkısı, büyümenin enerji yoğun sektörler üzerinden gerçekleştiğine işaret etmektedir. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %2,9'dan %11,1'e yükselerek, %8,2'lik bir artış meydana gelmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu durum, Meksika'nın ticaret ilişkileri yoluyla dolaylı karbon emisyonlarının arttığını ve karbon açısından görece yoğun ürünleri ithal etmeye başladığını göstermektedir. Analiz sonucunda yer alan dış ticaretin artırıcı etkisi (0.2307) ise ithal edilen ürünlerin görece yüksek karbon yoğunluğa sahip olması ve bu ürünlerin tüketim aşamasında dolaylı emisyon yaratmasıyla açıklanabilir. Nitekim ülkenin motorlu taşıt yedek parçaları, petrol yağları ve elektronik devreler gibi tüketim aşamasında dolaylı olarak CO₂ salınımına neden olacak ithalat kalemlerine sahip olması bu durumu açıklar niteliktedir (Santander Trade, 2025). Ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %86 oranında artış gösterirken, kişi başına CO₂ emisyonları ise %41, tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %52 oranında artmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu artış, ekonomik büyümenin karbon yoğun sektörlerde gerçekleştiğine ve çevreci üretim teknolojilerinin yeterince yaygınlaşmadığına işaret etmektedir.

Öte yandan $\ln(YET)$, $\ln(DYY)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.2224), (-0.0082) ve (-0.8006) standart sapmalılık azalışa yol açmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji tüketimi ve kentleşme kişi başına karbon emisyonlarını azaltıcı yöndeki etkisi, Meksika'da çevreci enerji politikalarının ve sürdürülebilir şehirleşme uygulamalarının belirli düzeyde etkili olduğunu düşündürmektedir. Ülkenin 2023 yılında toplam elektrik üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edildiği oran %21,50'dir (Our World in Data, 2024l). Bu oran, yenilenebilir enerjinin elektrik üretiminde sınırlı bir paya sahip olduğunu gösterse de analizdeki negatif yönlü etki, bu kaynakların karbon salımını azaltma potansiyelini taşıdığını göstermektedir. Bu da yenilenebilir enerji kullanımının artırılmasının emisyonları düşürmede daha güçlü sonuçlar doğurabileceğine işaret etmektedir. Ülkede 1991-2023 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı %1,52'den %1,69'a yükselerek, %0,17'lik artış sergilemiştir (Our

World in Data, 2024h). Bu artış oldukça sınırlı düzeyde olup, model sonuçlarında da doğrudan yabancı yatırımların CO₂ emisyonları üzerindeki etkisinin zayıf ve azaltıcı yönde olduğu görülmektedir. Ülkede 2023 yılında kentleşme oranı %82,1'dir (Our World in Data, 2024i). Model sonucu kentleşmenin CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkisi (-0.8006) oldukça güçlüdür. Meksika'da sürdürülebilir kentleşmeye yönelik ise Yeşil Plan (Plan Verde), Akıllı Şehir Girişimleri ve Guadalajara'da Hanehalkı Tüketiminin Karbon Ayak İzi Analizi gibi çeşitli projeler uygulanmaktadır (Alawadhi vd., 2012; Madero ve Morris, 2016; Hernandez ve Vita, 2022). Bu açıdan ilgili projelerin analiz sonucunu destekleyici şekilde yürütüldüğünü söylemek mümkündür. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (0.0308) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen ln(CO₂) değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak Meksika'da karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimi olup, bunu ekonomik büyüme ve dış ticaret izlemektedir. Buna karşılık, emisyonları azaltıcı yönde en etkili unsur kentleşme ve yenilenebilir enerji tüketimi olarak öne çıkmaktadır. Doğrudan yabancı yatırımların çevresel etkisinin oldukça sınırlı düzeyde kaldığı görülmektedir. Mısır için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.41'de sunulmuştur.

Tablo 4.41. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Mısır

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0202	Pozitif
ln(YET)	-0.0261	Negatif
ln(FET)	1.0333	Pozitif
ln(DT)	-0.0882	Negatif
ln(DYY)	0.1792	Pozitif
ln(GSYİH)	-0.1526	Negatif
ln(KENT)	0.0163	Pozitif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9835
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0261
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0325
Görelî Mutlak Hata (RAE)		16.4389 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		18.3395 %

Tablo 4.41'e göre, modelin MAE (0.0261) ve RMSE (0.0325) değerlerinin makul seviyelerde olması, modelin hata seviyesinin kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. RAE (%16.4389) ve RRSE (%18.3395) değerleri diğer bazı ülkelere kıyasla biraz daha yüksek olsa da modelin tahmin performansının genel olarak başarılı olduğu söylenebilir. Korelasyon katsayısının (0.9835) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu göstermektedir.

Mısır'da $\ln(\text{FET})$, $\ln(\text{DYY})$ ve $\ln(\text{KENT})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ 'de sırasıyla (1.0333), (0.1792) ve (0.0163) standart sapmalılık artışa neden olmaktadır. Özellikle fosil enerji tüketimi, karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, Mısır'ın enerji üretiminde büyük ölçüde fosil enerjilere bağımlı olduğunu ve bu bağımlılığın karbon salınımı üzerindeki etkisinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Mısır'da karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimi olup, ülkede 2023 yılı birincil enerji tüketimi içerisinde fosil enerji tüketiminin payının %94,11 olması bu durumu açıklar niteliktedir (Our World in Data, 2025b). Doğrudan yabancı yatırımların da pozitif yönde bir etkisi (0.1792) belirlenmiştir. 1991-2023 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı %0,68'den %2,48'e artarak, %1,80'lik artış sergilemiştir (Our World in Data, 2024h). Ülkeye yapılan doğrudan yabancı yatırımların artmasıyla birlikte analiz sonucunda yapılan DYY'lerin kişi başına CO_2 emisyonlarını artırıcı etkide bulunması, ülkeye yapılan yatırımların karbon yoğun olduğunu işaret etmektedir. Bardi ve Hfaiedh (2021) çalışmalarında Mısır'da çevresel düzenlemelerin zayıf olması nedeniyle kirletici yatırımların ülkeye yapıldığı sonucuna ulaşması da analiz sonucuyla örtüşmekte ve Mısır'daki DYY'lerin emisyon artışına yol açmasının temelinde çevresel düzenlemelerdeki yetersizliğin bulunduğunu göstermektedir. Ülkede 2023 yılında kentleşme oranı %51,4'tür (Our World in Data, 2024i). Bu oran, kentleşmenin henüz olgun bir yapıya ulaşmadığını göstermektedir. Model sonuçlarına göre kentleşmenin karbon emisyonlarını artırıcı etkisi (0.0163) oldukça düşük düzeydedir ve Mısır'da kentleşmenin henüz emisyonlar üzerinde belirgin bir baskı oluşturacak ölçekte olmadığını göstermektedir. Mısır'da ulaşım sektörü, fosil yakıtların yoğun kullanımı nedeniyle ülke toplam CO_2 emisyonlarının yaklaşık dörtte birine neden olmaktadır (Moussa, 2023). Dolayısıyla Mısır'da kentleşmenin beraberinde getirdiği ulaşım talebi, fosil yakıt tüketimini artırarak emisyonlarda artış gözlemlenmesine ve bu durumda analiz sonucundaki kentleşme

değişkeninin kişi başına CO₂ emisyonları üzerindeki artışın bir nedeni olarak gösterilebilir.

Öte yandan $\ln(YET)$, $\ln(DT)$ ve $\ln(GSYİH)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.0261), (-0.0882) ve (-0.1526) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. 2023 yılında yenilenebilir enerji birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %5,89; toplam elektrik üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edildiği oran %11,3'tür (Our World in Data, 2024j; Our World in Data, 2024l). Yenilenebilir enerji tüketiminin emisyonları azaltıcı etkisi gözlemlense de etkinin oldukça sınırlı olması, Mısır'ın temiz enerjiye geçiş sürecinde yeterli seviyeye ulaşamadığını göstermektedir ki birincil enerji tüketim miktarının %94,11'inin fosil enerjiden elde edilmesi bunu desteklemektedir. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %-1,4'ten %1,7'ye yükselerek %3'lük bir artış meydana gelmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu durum, ülkenin net gömülü karbon ihracatçısı iken ithalatçısı konumuna geldiğini göstermekte ve analiz sonucunda elde edilen kısıtlı azaltıcı etkiyi açıklar niteliktedir. Ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %290 oranında artış gösterirken, kişi başına CO₂ emisyonları ise %251 ve tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %262 oranında artmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu durum, ekonomik büyümenin yüksek oranda karbon yoğun sektörler üzerinden gerçekleştiğini ve çevresel sürdürülebilirlik ilkelerinin büyüme sürecinde yeterince dikkate alınmadığını göstermektedir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (0.0202) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen $\ln(CO_2)$ değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak Mısır'da karbon emisyonlarını artıran en önemli faktör fosil enerji tüketimi olurken, doğrudan yabancı yatırımların da görece yüksek bir etkisi bulunmaktadır. Buna karşın, yenilenebilir enerji tüketimi, dış ticaret ve ekonomik büyüme karbon salınımını azaltan faktörler olarak öne çıkmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerjinin etkisinin düşük olması, temiz enerji politikalarının daha da güçlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu bulgular, sürdürülebilir enerjiye geçiş sürecinin hızlandırılmasının, karbon emisyonlarını azaltmada önemli bir rol oynayabileceğini ortaya koymaktadır. Şili için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.42'de sunulmuştur.

Tablo 4.42. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Şili

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	-0.0521	Negatif
ln(YET)	-0.2371	Negatif
ln(FET)	0.4275	Pozitif
ln(DT)	-0.1505	Negatif
ln(DYY)	-0.0109	Negatif
ln(GSYİH)	0.9584	Pozitif
ln(KENT)	-0.1605	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9786
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0342
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0447
Görelî Mutlak Hata (RAE)		18.8377 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		20.2908 %

Tablo 4.42’ e göre, modelin MAE (0.0342) ve RMSE (0.0447) değerlerinin kabul edilebilir seviyelerde olduğu görülmektedir. RAE (%18.8377) ve RRSE (%20.2908) değerleri bazı ülkelere kıyasla biraz daha yüksek olsa da modelin tahmin performansının genel olarak iyi olduğu söylenebilir. Korelasyon katsayısının (0.9786) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu göstermektedir.

Şili’de ln(FET) ve ln(GSYİH) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)’de sırasıyla (0.4275) ve (0.9584) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Özellikle ekonomik büyüme, kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, ülkenin büyüme sürecinin yüksek enerji talebiyle ve sanayi odaklı bir yapıyla ilerlediğini göstermektedir. Fosil enerji tüketiminin de emisyonları önemli ölçüde artırması, Şili’nin enerji üretiminde hâlen büyük ölçüde fosil kaynaklara bağımlı olduğunu ortaya koymaktadır. Muhtemelen Şili’nin dünyanın en büyük bakır üreticisi ve ikinci büyük lityum üreticisi olması bu yapıyı desteklemektedir (International Trade Administration, 2023). Zira bu tür madencilik faaliyetleri yüksek miktarda enerji gerektirir ve genellikle karbon yoğun kaynaklara dayanır. Ülkenin 2023 yılı birincil enerji tüketimi içerisinde fosil enerji tüketiminin payı ise %69,47’dir (Our World in Data, 2024f). Bu oran, analiz bulgularını destekler niteliktedir. Ülkenin kişi başına GSYİH’si 1991-2022 yılları arasında %261 oranında artış gösterirken, kişi başına CO₂ emisyonları %167 ve

tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %191 oranında artış göstermiştir (Our World in Data, 2024k). Bu artışlar, ekonomik büyümenin çevresel etkilerinin ciddi boyutlara ulaştığını göstermektedir.

Öte yandan $\ln(YET)$, $\ln(DT)$, $\ln(DYY)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.2371), (-0.1505), (-0.0109) ve (-0.1605) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. Bu sonuçlara göre Şili'de karbon emisyonlarını azaltmada en etkili unsurlar yenilenebilir enerji tüketimi, dış ticaret ve kentleşme olmuştur. Özellikle yenilenebilir enerji kullanımının bu olumlu etkisi, ülkenin enerji dönüşüm politikalarının çevresel fayda üretmeye başladığını göstermektedir. Nitekim, 2023 yılı itibarıyla elektrik üretiminin %64,40'ının yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmakta; kentleşme oranı ise %91,9'dur (Our World in Data, 2024l; Our World in Data, 2024i). Kentleşmenin emisyonları azaltıcı yöndeki etkisi ise şehirleşme sürecinde çevresel sürdürülebilirliğin belirli ölçüde dikkate alındığını göstermektedir. Nitekim Şili'de sürdürülebilir kentleşmeyi sağlamak için Santiago elektrikli otobüs filosu ve ulusal elektromobilité stratejisi gibi çeşitli uygulamaların mevcuttur (Kundu vd., 2024; Borne vd., 2025). 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %0'dan %8,8'e yükselerek, %8,8'lik bir artış meydana gelmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu artış, Şili'nin net gömülü karbon ithalatçısı hâline geldiğini ve ülkedeki analiz sonucunda elde edilen dış ticaretin emisyonlar üzerindeki azaltıcı etkisini açıklar niteliktedir. Şili'de doğrudan yabancı yatırımların kişi başına emisyonlarını azaltıcı etkisi (-0.0109)'dur. Ülkede DYY stokunun yaklaşık %30'u finans, yenilenebilir enerji, ticaret ve orta-düşük teknoloji imalat sektörleri üzerine gerçekleştirilmektedir (OECD, 2023). Şili'ye gelen bu yabancı yatırımların sürdürülebilir ve daha az kirletici sektörlerde yoğunlaşması, analiz sonucundaki DYY'nin kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkisini açıklamaktadır. Ayrıca modelin sabiti olan sapma terimi (-0.0521) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen $\ln(CO_2)$ değerinde çok sınırlı bir azalışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak Şili'de karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken ekonomik büyüme olurken, bunu fosil enerji tüketimi takip etmektedir. Buna karşılık, emisyonları azaltan en etkili faktör yenilenebilir enerji tüketimi olup, dış ticaret ve

kentleşme de emisyonlar üzerinde azaltıcı yönde katkı sağlamaktadır. Türkiye için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.43’te sunulmuştur.

Tablo 4.43. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Türkiye

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0055	Pozitif
ln(YET)	-0.0121	Negatif
ln(FET)	0.9402	Pozitif
ln(DT)	0.0019	Pozitif
ln(DYY)	-0.0221	Negatif
ln(GSYİH)	0.1623	Pozitif
ln(KENT)	-0.0903	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9958
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0181
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0208
Görelî Mutlak Hata (RAE)		8.6167 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		8.9554 %

Tablo 4.43’e göre, modelin MAE (0.0181) ve RMSE (0.0208) değerlerinin kabul edilebilir seviyelerde olduğu görülmektedir. RAE (%8.6167) ve RRSE (%8.9554) değerleri, modelin hata oranının makul seviyelerde olduğunu ve tahmin performansının genel olarak iyi olduğunu göstermektedir. Korelasyon katsayısının (0.9958) yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklama gücünün iyi olduğunu göstermektedir.

Türkiye’de ln(FET), ln(DT) ve ln(GSYİH) değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, ln(CO₂)’de sırasıyla (0.9402), (0.0019) ve (0.1623) standart sapmalık artışa neden olmaktadır. Türkiye’de kişi başına karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimidir. Nitekim 2023 yılında fosil yakıtlardan elde edilen enerji tüketimi 1.581,51 TWh olup, birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %81,30’dur (Our World in Data, 2024j; Our World in Data, 2025n). Bu oran, Türkiye’nin enerji arzında hâlâ büyük oranda fosil kaynaklara bağımlı olduğunu ve bu yapının karbon emisyonları üzerinde belirleyici etkisini sürdürdüğünü göstermektedir. Ekonomik büyüme değişkeninin de pozitif yönlü etkisi, Türkiye’de büyümenin büyük ölçüde enerji yoğun sektörler üzerinden gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. 2023 yılı itibarıyla sanayi sektörünün GSYİH içindeki payının %28,38;

imalat sanayinin payının ise %19,55 olması (TheGlobalEconomy.com, t.y.), sanayi temelli büyüme yapısının çevresel baskılarla olan ilişkisini destekler niteliktedir. Bu yapı, daha sürdürülebilir üretim süreçlerine geçiş ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO₂ emisyonlarına oranı %35'ten %-5,4'e düşerek, %40,4'lük bir azalış meydana gelmiştir (Our World in Data, 2024g). Bu düşüş, Türkiye'nin zamanla üretim temelli net karbon ihracatçısı hâline geldiğini göstermekte ve analiz sonucu elde edilen emisyonlar üzerindeki kısmi azaltıcı etkisini desteklemektedir. Ayrıca, ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %311 oranında artış gösterirken, kişi başına CO₂ emisyonları ise %177; tüketim temelli kişi başına CO₂ emisyonları ise %94 oranında artmıştır (Our World in Data, 2024k). Bu göstergeler, büyümenin yüksek karbon ayak iziyle birlikte gerçekleştiğini ve ekonomik gelişmişliğin çevresel etkilerle birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Öte yandan $\ln(YET)$, $\ln(DYY)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.0121), (-0.0221) ve (-0.0903) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. Bu durum, özellikle yenilenebilir enerji tüketimi ve kentleşmenin karbon emisyonlarını azaltıcı yönde etki gösterdiğini ortaya koymakta; Türkiye'de son yıllarda artan temiz enerji yatırımları ile kentsel altyapı iyileştirmelerinin çevresel fayda sağlamaya başladığını düşündürmektedir. Nitekim 2023 yılında yenilenebilir enerjinin birincil enerji tüketimi içerisindeki payı %18,70; toplam elektrik üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edildiği oran ise %42'dir (Our World in Data, 2024j; Our World in Data, 2024l). Bu oranlar, yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaşmakta olduğunu ancak henüz enerji sistemine tam anlamıyla hâkim olmadığını göstermektedir. 1991-2023 yılları arasında ülkede doğrudan yabancı yatırımların GSYİH'ye oranı %0,54'ten %0,98'e yükselerek %0,44'lük artış göstermiştir (Our World in Data, 2024h). Bu artışa rağmen, DYY'nin karbon emisyonları üzerindeki etkisinin (-0.0221) oldukça sınırlı düzeyde kalması, yatırımların çevresel sürdürülebilirlik açısından henüz belirleyici nitelikte olmadığını düşündürmektedir. Ülkede 2003-2023 yılları arasında en fazla doğrudan yabancı yatırım gerçekleştirilen sektörler finans (%30,7), imalat (%24,2) ve enerji (%10,3)'dir (Türkiye Cumhuriyeti Yatırım ve Finans Ofisi, t.y). Sektörel yatırımların bu dağılımı, DYY'nin karbon emisyonları üzerindeki sınırlı azaltıcı etkisinin temel açıklayıcısı

olarak kabul edilebilir. Türkiye'nin 2023 yılı kentleşme oranı ise %73,4 olup (Our World in Data, 2024i), kentleşmenin emisyonlar üzerinde azaltıcı etkisi, ülkede sürdürülebilir kentsel planlama politikaları ve çevreci uygulamalara yönelindiğini göstermektedir. Türkiye'de sürdürülebilir kentleşme ve CO₂ emisyonlarının azaltılması amacıyla Ulusal İklim Değişikliği Strateji Belgesi, Ulusal İklim Değişikliği Eylem Planı, kentsel dönüşüm uygulamaları ve yeşil bina sertifikasyonu gibi çeşitli politika ve projeler hayata geçirilmiştir (Diker, 2019; Karademir ve Dağ, 2021; Gergin, 2024; Öbük ve Sınmaz, 2024). Dolayısıyla Türkiye'de artan kentleşme oranına rağmen çevreci planlama ve sürdürülebilir uygulamaların hayata geçirilmesi, yapılan analizde kentleşme değişkeninin kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkisini ortaya koymaktadır. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (0.0055) tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen $\ln(\text{CO}_2)$ değerinde çok sınırlı bir artışa neden olmaktadır.

Sonuç olarak Türkiye'de karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimi olup, bu değişkeni ekonomik büyüme izlemektedir. Buna karşılık, emisyonları azaltıcı yönde en etkili değişkenler yenilenebilir enerji tüketimi ve kentleşmedir. Dış ticaret ve doğrudan yabancı yatırımların etkileri oldukça sınırlı kalmakla birlikte, dış ticaret pozitif; yatırımlar ise karbon yoğun sektörlerle işaret eden zayıf bir artış yönlü etki göstermektedir. Hindistan için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları Tablo 4.44'te sunulmuştur.

Tablo 4.44. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Hindistan

Değişkenler	Ağırlıklar (w)	Tahmini Etki Yönü
b	0.0004	Pozitif
$\ln(\text{YET})$	0.0498	Pozitif
$\ln(\text{FET})$	0.9662	Pozitif
$\ln(\text{DT})$	0.0269	Pozitif
$\ln(\text{DYY})$	-0.0334	Negatif
$\ln(\text{GSYİH})$	0.1824	Pozitif
$\ln(\text{KENT})$	-0.2173	Negatif
Performans Ölçütü		Değer
Korelasyon Katsayısı		0.9976
Ortalama Mutlak Hata (MAE)		0.0181
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)		0.0234
Görelî Mutlak Hata (RAE)		5.8598 %
Kök Görelî Mutlak Hata (RRSE)		6.8852 %

Tablo 4.44'e göre, modelin korelasyon katsayısının (0.9976) oldukça yüksek olması, bağımsız değişkenlerin karbon emisyonlarını açıklamadaki gücünü ortaya koymaktadır. MAE (0.0181) ve RMSE (0.0234) değerlerinin düşük çıkması, modelin hata oranının kabul edilebilir seviyelerde olduğunu göstermektedir. Ayrıca RAE (%5.8598) ve RRSE (%6.8852) değerleri de modelin tahmin performansının başarılı olduğunu desteklemektedir.

Hindistan'da $\ln(\text{YET})$, $\ln(\text{FET})$, $\ln(\text{DT})$ ve $\ln(\text{GSYİH})$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalılık değişim, $\ln(\text{CO}_2)$ 'de sırasıyla (0.0498), (0.9662), (0.0269) ve (0.1824) standart sapmalılık artışa neden olmaktadır. Bulgularda, Hindistan'da karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken fosil enerji tüketimi olup, ülkenin enerji arzında hâlâ kömür gibi karbon yoğun kaynakların baskın olduğunu görülmektedir. Nitekim 2023 yılı itibarıyla birincil enerji tüketimi içerisinde fosil enerji tüketiminin payı %89,21'dir (Our World in Data, 2024f). Bu oran, fosil kaynaklara olan bağımlılığın hâlen çok yüksek seviyede seyrettiğini göstermektedir. Yenilenebilir enerji tüketiminin ise çok sınırlı da olsa karbon emisyonlarını artırıcı yönde etki göstermesi dikkat çekicidir. Bu etki özellikle hidroelektrik santrallerin baskın rolüyle açıklanabilir. 2023 yılında yenilenebilir enerji kaynakları arasında en fazla elektrik üretimi hidroelektrik enerjiden (149,17 TWh) sağlanmış, onu sırasıyla güneş (113,41 TWh), rüzgâr (82,11 TWh) ve biyoenerji ile diğer kaynaklar (37,28 TWh) takip etmiştir (Our World in Data, 2024m). Özellikle hidroelektrik üretim süreçlerinde ortaya çıkan metan gazı salımı ve çevresel etkiler bu sınırlı artışın kaynağı olabilir. Ayrıca ekonomik büyümenin emisyonlara olan katkısı da önemli düzeydedir. Hindistan'da büyümenin, enerji yoğun ve karbon salınımı yüksek sektörler üzerinden gerçekleştiği görülmektedir. Nitekim ülkenin kişi başına GSYİH'si 1991-2022 yılları arasında %532 oranında artarken, kişi başına CO_2 emisyonları %360, tüketim temelli kişi başına CO_2 emisyonları ise %330 oranında artış göstermiştir (Our World in Data, 2024k). Bu veriler, büyümenin çevresel maliyetinin oldukça yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Dış ticaretin de emisyonları artırıcı yönde etkisi olduğu gözlemlenmektedir. Ancak 1991-2022 yılları arasında ülkenin dış ticaret yoluyla gömülü karbon emisyonlarının, toplam üretim bazlı CO_2 emisyonlarına oranı %-3,1'den %-9,3'e gerileyerek %6,2'lik bir azalış göstermiştir (Our World in Data, 2024g). Bu düşüş, Hindistan'ın gömülü net karbon ihracatçısı konumunu daha da

güçlendirdiğini ve üretim temelli emisyon yükünün içeride kaldığını ortaya koymakta ve analiz sonucu elde edilen emisyonlar üzerindeki artırı etkiyi desteklemektedir.

Öte yandan $\ln(DYY)$ ve $\ln(KENT)$ değişkenlerinde meydana gelen 1 standart sapmalık değişim, $\ln(CO_2)$ 'de sırasıyla (-0.0334) ve (-0.2173) standart sapmalık azalışa yol açmaktadır. 1991-2023 yılları arasında DYY'nin GSYİH'ye oranı %0,03'ten %0,79'a yükselmiş ve %0,76'lık bir artış sergilemiştir (Our World in Data, 2024h). Hindistan'da 1990'lardan itibaren ekonomide serbestleşme politikaları uygulanmıştır ve DYY'lerin sektörel dağılımı ise en çok hizmet, bilgisayar yazılımı ve donanımı, telekomünikasyon, inşaat, otomotiv şeklindedir (Furmoly, 2015). DYY'lerde ekonomideki serbestliğe bağlı olarak artış gözlemlenmiş olsa da ülkeye yapılan DYY'lerin sektörel dağılımlarına bakıldığında sektörlerin düşük karbon yoğun olmaları, analiz sonucu elde edilen emisyonlar üzerindeki kısıtlı azaltıcı etkinin açıklaması olarak değerlendirilebilir. 2023 yılı itibarıyla kentleşme oranı ise %37,5 düzeyindedir (Our World in Data, 2024i). Bu oranlar, Hindistan'da yabancı yatırımların zaman içinde artış gösterdiğini, kentleşmenin ise hâlen sınırlı düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır. Hindistan'da sürdürülebilir kentleşme kapsamında öne çıkan uygulamalar arasında Delhi Metrosu, Ahmedabad'daki Hızlı Otobüs Taşımacılığı Sistemi (BRTS) ve Chennai'de yürütülen Akıllı Şehirler Programı bulunmaktadır (Rogat vd., 2015; Aggarwal ve Jain, 2016; Govindarajan ve Ganesh, 2021). Söz konusu uygulamaların varlığı, ülkede sürdürülebilir kentleşmeye katkı sağlamakta ve bu durum analiz sonucunda elde edilen kentleşme değişkeninin kişi başına CO_2 emisyonlarını azaltıcı etkisinin açıklayıcısı niteliğindedir. Ayrıca modelde yer alan sapma terimi (0.004), tüm bağımsız değişkenlerin standartlaştırılmış düzeyde olduğu bir durumda, tahmin edilen $\ln(CO_2)$ değerinde çok sınırlı bir artışa yol açmaktadır.

Sonuç olarak Hindistan'da CO_2 emisyonlarını en fazla artıran değişkenin fosil enerji tüketimi olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla ekonomik büyüme, yenilenebilir enerji tüketimi ve dış ticaret izlemektedir. Öte yandan, doğrudan yabancı yatırımlar ve kentleşme değişkenleri karbon emisyonlarını azaltıcı yönde etki göstermektedir. Bu bulgular, Hindistan'ın sürdürülebilir enerjiye geçişte henüz istenilen seviyeye ulaşamadığını, ancak çevre dostu yatırımlar ve bazı kentsel uygulamaların olumlu etkiler yaratmaya başladığını göstermektedir. Küme 3 ülkeleri için SMOreg algoritması ile DVR sonuçları özet olarak Tablo 4.45'te sunulmuştur.

Tablo 4.45. SMOreg Algoritması ile DVR Sonuçları: Küme 3 Özet Tablosu

Ülke	ln(YET)	ln(FET)	ln(DT)	ln(DYY)	ln(GSYİH)	ln(KENT)
Arjantin	-0.1478	0.696	0.2252	-0.0096	0.2814	-0.045
	<i>R: 0.9796, MAE: 0.0174, RMSE: 0.0239, RAE: 17.0604 %, RRSE: 20.4439 %</i>					
Brezilya	0.1391	0.9908	0.0089	0.0494	0.019	-0.2057
	<i>R: 0.9918, MAE: 0.0153, RMSE: 0.0189, RAE: 12.1857 %, RRSE: 12.4182 %</i>					
Endonezya	-0.0328	0.4263	0.1009	0.0222	0.2717	0.3735
	<i>R: 0.9828, MAE: 0.0383, RMSE: 0.0497, RAE: 17.4373 %, RRSE: 18.6304 %</i>					
Fas	0.0054	0.7295	-0.0487	0.0439	0.2054	0.0824
	<i>R: 0.9923, MAE: 0.023, RMSE: 0.0281, RAE: 11.3746 %, RRSE: 12.2612 %</i>					
Meksika	-0.2224	0.7249	0.2307	-0.0082	0.5002	-0.8006
	<i>R: 0.9595, MAE: 0.0133, RMSE: 0.0184, RAE: 23.7731 %, RRSE: 27.6166 %</i>					
Mısır	-0.0261	1.0333	-0.0882	0.1792	-0.1526	0.0163
	<i>R: 0.9835, MAE: 0.0261, RMSE: 0.0325, RAE: 16.4389 %, RRSE: 18.3395 %</i>					
Şili	-0.2371	0.4275	-0.1505	-0.0109	0.9584	-0.1605
	<i>R: 0.9786, MAE: 0.0342, RMSE: 0.0447, RAE: 18.8377 %, RRSE: 20.2908 %</i>					
Türkiye	-0.0121	0.9402	0.0019	-0.0221	0.1623	-0.0903
	<i>R: 0.9958, MAE: 0.0181, RMSE: 0.0208, RAE: 8.6167 %, RRSE: 8.9554 %</i>					
Hindistan	0.0498	0.9662	0.0269	-0.0334	0.1824	-0.2173
	<i>R: 0.9976, MAE: 0.0181, RMSE: 0.0234, RAE: 5.8598 %, RRSE: 6.8852 %</i>					

Tablo 4.45’e göre, Küme 3’te yer alan ülkelerde karbon emisyonlarını en fazla artıran değişken çoğu durumda fosil enerji tüketimi olmuştur. Bu durum; Mısır (1.0333), Brezilya (0.9908), Hindistan (0.9662) ve Türkiye (0.9402) gibi ülkelerde, fosil yakıtların enerji üretiminde hâlâ baskın konumda olduğunu göstermektedir. Ekonomik büyüme de bazı ülkelerde emisyonları artıran önemli bir değişken olarak öne çıkmaktadır. Özellikle Şili (0.9584) ve Meksika (0.5002) gibi ülkelerde bu ilişkinin daha güçlü olduğu görülmektedir.

Yenilenebilir enerji tüketimi değişkeni ise ülkelere göre farklı etkiler göstermektedir. Örneğin, Şili (-0.2371), Meksika (-0.2224) ve Arjantin (-0.1478) gibi ülkelerde bu değişken emisyonları azaltıcı yönde etkili olurken; Brezilya (0.1391) ve Hindistan (0.0498) gibi ülkelerde ise artış yönlü bir ilişki gözlenmiştir. Bu farklılık, yenilenebilir kaynakların sistem içindeki payı, kaynak çeşitliliği ve altyapı kalitesi ile ilişkilendirilebilir. Kentleşme değişkeni bazı ülkelerde emisyonları artırıcı yönde etki ederken (Endonezya: 0.3735, Fas: 0.0824), birçok ülkede ise azaltıcı etkiler göstermektedir. Özellikle Meksika (-0.8006), Hindistan (-0.2173), Şili (-0.1605) ve Türkiye (-0.0903) gibi ülkelerde kentleşmenin emisyonları azaltma yönünde katkı

sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu ülkelerdeki bazı sürdürülebilir kentsel altyapı ve çevreci şehircilik uygulamalarıyla ilişkilendirilebilir.

Dış ticaret değişkeni genel olarak pozitif etki göstermektedir. Meksika (0.2307), Arjantin (0.2252) ve Endonezya (0.1009) gibi ülkelerde karbon emisyonlarını artırırken; Şili (-0.1505), Mısır (-0.0882) ve Fas (-0.0487) gibi ülkelerde azaltıcı bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu farklılıklar, ülkelerin dış ticaret kompozisyonuna, yani enerji yoğun sektörlerin ihracattaki payına göre şekilleniyor olabilir. Doğrudan yabancı yatırımların etkisi ise genel olarak sınırlıdır. Ancak bazı ülkelerde azaltıcı (Arjantin, Şili, Türkiye) bazı ülkelerde ise artırıcı (Mısır, Endonezya) yönde etki göstermektedir. Bu da gelen yabancı sermayenin çevreci ya da karbon yoğun sektörlerle yönelmesine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Sonuç olarak Küme 3 ülkelerinde karbon emisyonları üzerinde en belirgin artırıcı etkiyi fosil enerji tüketimi yaratmaktadır. Ekonomik büyüme ve dış ticaret gibi faktörler de birçok ülkede emisyonları artırmaktadır. Buna karşılık, yenilenebilir enerji tüketimi, kentleşme ve bazı durumlarda doğrudan yabancı yatırımlar, emisyonları azaltma potansiyeline sahiptir. Ancak bu etkiler ülke özelinde farklılık göstermekte olup, her ülkenin enerji yapısı, kentleşme modeli ve yatırım tercihleri dikkate alınarak ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir.

5. SONUÇ

Küresel ısınma ve buna bağlı olarak çevresel bozulma gün geçtikçe artış göstermektedir. Özellikle fosil yakıtların kullanılmasıyla oluşan CO₂ emisyonları çevreye ve canlı yaşamına büyük ölçüde zarar vermektedir. Ekonomik büyüme, uluslararası ticari ilişkilerin artması, sanayileşme, enerji bağımlılığı, ormansızlaşma ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklı sorunlar gibi birçok nedenden ötürü CO₂ emisyon değerleri tüm dünyada hızla artış göstermeye devam etmektedir. Bu artışlar ülkelerin CO₂ emisyonu sorununa çözüm bulması için çalışmalar yapmaya başlamasına, sürdürülebilir bir kalkınma için yeni hedefler belirlemelerine neden olmuştur. CO₂ emisyonlarındaki artış aynı zamanda birçok bilimsel çalışmayı da beraberinde getirmiştir. Buna bağlı olarak CO₂ emisyon azaltım stratejileri geliştirilebileceği hakkında yapılan çalışmalar politika yapıcılar için de önemli ve yol gösterici hale gelmiştir.

Bu doğrultuda çalışmanın amacını RECAI ülkelerinde CO₂ emisyonuna etki eden faktörlerin makine öğrenmesi yöntemleri ile incelenmesi oluşturmaktadır. Çalışmada yenilenebilir enerji tüketimi, fosil enerji tüketimi, dış ticaret, doğrudan yabancı yatırım, ekonomik büyüme ve kentleşme bağımsız değişkenler olarak belirlenmiş, 1991-2023 dönemi verileri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada ilk olarak ülkeler kişi başına karbon emisyonlarına göre X-Means algoritması kullanılarak “yüksek, orta-yüksek, orta ve düşük” kişi başına CO₂ emisyonuna sahip olan ülkeler şeklinde dört ayrı kümeye ayrılmıştır. Küme 0 ABD, Avustralya ve Kanada olmak üzere yüksek kişi başına CO₂ emisyonuna sahip olan ülkelere oluşmaktadır. Küme 1 Birleşik Krallık, Güney Afrika, Güney Kore, Almanya, Belçika, Danimarka, Finlandiya, Hollanda, İrlanda, İsrail, Japonya ve Norveç olmak üzere yüksek-orta kişi başına CO₂ emisyonuna sahip olan ülkelere oluşmaktadır. Küme 2 Çin, İspanya, İtalya, Yunanistan, Fransa, İsveç, İsviçre ve Macaristan gibi orta kişi başına CO₂ emisyonuna sahip olan ülkeleri kapsamaktadır. Son olarak Küme 3 Arjantin, Brezilya, Endonezya, Fas, Hindistan, Meksika, Mısır, Şili ve Türkiye ülkelerinden oluşmakta ve bu ülkeler düşük kişi başına CO₂ emisyonuna sahip olan ülkelerdir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, her bir ülkede kişi başına CO₂ emisyonuna etki eden faktörleri belirlemek için destek vektör regresyonunun WEKA uyarlaması olan

SMOreg algoritması uygulanmıştır. Analiz sonuçlarında her bir ülke için ayrı ayrı kişi başına CO₂ emisyonuna etki eden değişkenlerin ağırlık katsayıları belirlenmiştir. Daha sonra ise bu katsayılardan yola çıkarak 4 küme için genel değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Küme 0 kişi başına yüksek CO₂ emisyonlu ülkeler “ABD, Avustralya ve Kanada” incelendiğinde, ülkelerde ortak özellik fosil enerji tüketiminin kişi başına CO₂ emisyonunu artırmasıdır. Yenilenebilir enerji tüketiminin ise en çok azaltan değişken olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, bu kümede yer alan ülkelerde ABD hariç ekonomik büyüme hâlen CO₂ emisyonunu artırıcı etki göstermektedir. Ancak ABD’de azaltıcı etki göstermesi ise ABD’de artık ekonomik büyümenin CO₂ emisyonlarını azaltıcı yönde etki ettiğini yani ÇKE’deki ters U şeklindeki döngüye girdiğini göstermektedir. Küme 0’da kentleşmenin, bazı ülkelerde CO₂ emisyonlarını artırıcı, bazı ülkelerde ise azaltıcı yönde etkisi bulunmuştur. Bu durum ülkelerde kentleşme politikalarının ve şehirleşme dinamiklerinin farklı olduğunun göstergesidir. Dış ticaret ve doğrudan yabancı yatırımlar açısından kişi başına CO₂ emisyonuna etkilerine bakılacak olursa Küme 0 için, değişkenlerin etkisinin ülkeler arasında sınırlı ve görece düşük düzeyde olduğu söylenebilir. Bu farklılıklar, kişi başına yüksek CO₂ emisyonuna sahip olan dış ticaret ve doğrudan yabancı yatırımların gelişmiş ülkelerde emisyon seviyelerini doğrudan belirleyen değişkenler olmadığını göstermektedir.

Küme 1 kişi başına orta-yüksek CO₂ emisyonlu ülkeler “Birleşik Krallık, Güney Afrika, Güney Kore, Almanya, Belçika, Danimarka, Finlandiya, Hollanda, İrlanda, İsrail, Japonya ve Norveç” incelendiğinde, ülkelerde kişi başına CO₂ emisyonlarını en fazla artıran değişkenin fosil enerji tüketimi; ülkelerin çoğunda en çok azaltan değişken ise kentleşme iken; yenilenebilir enerji kullanımı onu takip etmektedir. Bununla birlikte özellikle Birleşik Krallık, Almanya ve Güney Afrika gibi bazı ülkelerde yenilenebilir enerjinin CO₂ emisyonlarını sınırlı da olsa artırıcı yönde etki gösterdiği dikkat çekmektedir. Dış ticaret ve doğrudan yabancı yatırımların ise bazı ülkelerde emisyonları düşürücü yönde etkisi söz konusu ülkeler için bu değişkenlerin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemini göstermektedir. Ekonomik büyümenin Almanya ve Norveç gibi bazı gelişmiş ülkelerde emisyonları azaltıcı yönde etki göstermesi ise bu ülkelerde ekonomik büyümenin çevresel etkilerinin artık ÇKE hipotezindeki gibi ters U biçimine dönüştüğünü göstermektedir.

Küme 2 kişi başına orta CO₂ emisyonlu ülkeler “Çin, İspanya, İtalya, Yunanistan, Fransa, İsveç, İsviçre ve Macaristan” incelendiğinde; kişi başına CO₂ emisyonlarını en çok artıran değişkenin fosil enerji tüketimi olduğu görülmektedir. Özellikle Çin, İspanya, İtalya, Yunanistan, Fransa, İsveç, İsviçre ve Macaristan’da fosil enerji tüketiminin kişi başına CO₂ emisyonları üzerindeki artırıcı gücü oldukça yüksektir. Küme 2’de ekonomik büyüme değişkeni ise Çin, İtalya ve Macaristan gibi ülkelerde kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı nitelikte iken; İspanya, Fransa ve İsveç’te negatif etki yapmaktadır. Bu durum bu ülkelerde ekonomik büyümenin daha çevreci ve düşük karbon yoğunluk büyümeyi benimsediğini göstermektedir. ÇKE hipotezindeki ekonomik büyüme arttıkça karbon emisyonlarının giderek azalma eğiliminde olması tezini desteklemektedir. Yenilenebilir enerji tüketimi açısından Küme 2 incelendiğinde; çoğu ülkede özellikle Çin, İspanya, İsviçre, Macaristan’da emisyonları azaltıcı yönde etkisi belirlenmiştir ancak Yunanistan ve İsveç gibi ülkelerde ise sınırlı da olsa kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı sonuçlar tespit edilmiştir. Kentleşme değişkeni ise İtalya, Fransa, İspanya, Macaristan, Çin ve Yunanistan gibi küme 2’nin çoğu ülkesinde kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı niteliktedir. Ancak İsviçre’de sınırlı düzeyde de olsa artırıcı sonuç vermiştir. Dış ticaret değişkeni Küme 2 ülkelerinde genellikle azaltıcı etkide bulunmuştur. Özellikle Macaristan, Çin ve Yunanistan’da bu azaltıcı etki oldukça belirgin seviyededir. Ancak bazı ülkelerde özellikle Fransa ve İsveç gibi ülkelerde artırıcı sonuçlar da göstermiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, dış ticarete, ticaretten kaynaklanan emisyonların sadece üretici ülkeler açısından değil aynı zamanda tüketici ülkeler içinde sorumluluk taşıdığıdır. Sanayi yoğun üretim yapan ülkelerde üretim esnasında çıkan emisyonlar, ithalat yapan ülkelere gömülü karbon olarak geçiş yapmaktadır ve bu durum emisyon yükünün aslında her iki taraf içinde düşünülmesi gerektiğini göstermektedir. Doğrudan yabancı yatırımların ise Küme 2’de özellikle İsviçre ve Yunanistan gibi ülkelerde emisyonları azaltıcı etkisi bulunsun da çoğu ülkede sınırlı etkileri bulunmaktadır. Sonuç olarak, Küme 2’de fosil enerji tüketimi kişi başına CO₂ emisyonlarını artıran en temel faktördür. Azaltıcı etki yapan en temel faktör ise kentleşme ve daha sonrasında ise yenilenebilir enerji ile dış ticarettir.

Küme 3 kişi başına düşük CO₂ emisyonlu ülkeler “Arjantin, Brezilya, Endonezya, Fas, Meksika, Mısır, Şili ve Türkiye, Hindistan” incelendiğinde; kişi başına CO₂ emisyonlarını en çok artıran değişken fosil enerji tüketimidir. Bu sonuç

Küme 3 düşük kişi başına CO₂ emisyonuna sahip olan ülkelerde halen büyük oranda fosil kaynaklara olan bağımlılığı gösterir niteliktedir. Yenilenebilir enerji tüketimi ve kentleşme değişkenleri ise bu kümede en çok kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltan değişkenler olarak dikkat çekmektedir. Söz konusu ülkelerde sürdürülebilir enerji ve şehirleşme uygulamalarının önemi tespit edilmiştir. Dış ticaret ve doğrudan yabancı yatırımların etkisi ise ülkeden ülkeye farklı ve sınırlı etkiler göstermektedir. Ekonomik büyüme değişkeni ise Küme 3 ülkelerinin çoğunda kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı nitelikte olup, söz konusu ülkelerde hala büyümenin karbon emisyonlarını artırdığını yani karbon yoğun bir büyüme biçimine sahip olduklarını göstermektedir.

Sonuç olarak tüm kümelerde yer alan ülkeler birlikte değerlendirildiğinde ise kişi başına CO₂ emisyonlarını en fazla artıran değişkenin fosil enerji tüketimi olduğu belirlenmiştir. Özellikle “ABD, Kanada, Avustralya, Çin, Hindistan, Almanya, Birleşik Krallık, Fransa, Meksika, Güney Afrika, Güney Kore, Macaristan, Arjantin, Endonezya, İtalya, İsviçre, İsrail” gibi ülkelerde bu sonuç daha belirgin durumdadır. Bu sonuç, Bölük ve Mert (2014), Shafiei ve Salim (2014), İnglesi-Lotz ve Doğan (2018), Li ve Haneklaus (2021), Chen vd. (2022), Itoo ve Ali (2023), Karakurt ve Aydın (2023), Kartal (2023) ve Yue ve Bu (2023)’ün çalışmalarındaki sonuçları destekler niteliktedir. Tüm ülkelerden elde edilen sonuçlara göre fosil yakıt tüketiminin baskın bir şekilde kişi başına CO₂ emisyonları üzerindeki artırıcı etkisi, ülkelerde çevresel zararların da artacağını göstermektedir. Bu açıdan ülkelerde bu fosil kaynakların neden olduğu zararların belirlenmesi ve negatif dışsallık yaklaşımında olduğu gibi çevreye zarar veren uygulamalar adına karbon vergisi gibi düzenlemeler ile bu durumun önüne geçilmesi gerekmektedir.

Yenilenebilir enerji tüketimi değişkeni ise birçok ülkede kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltan bir faktör olarak belirlenmiştir. Özellikle “ABD, Kanada, Çin, Türkiye, Norveç, İsviçre, Macaristan, İspanya, Arjantin, Meksika, Mısır, Danimarka, İsrail ve Şili” gibi ülkelerde bu etki oldukça belirgindir. Bu sonuç Shafiei ve Salim (2014), İnglesi-Lotz ve Doğan (2018), Liu ve Bae (2018), Pata ve Yurtkuran (2018), Li ve Haneklaus (2021), Kırıkkaleli vd. (2022), Lei vd. (2022), Ahmed vd. (2022), Chen vd. (2022), Dong vd. (2022), Mentel vd. (2022), Hao ve Chen (2023), Kartal (2023) ve Pata vd. (2023) tarafından yapılan çalışmalardan da elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir. Bununla birlikte bazı (Güney Afrika, Birleşik Krallık, Almanya, Yunanistan ve İsveç gibi) ülkelerde yenilenebilir enerji tüketimi, kişi başına CO₂

emisyollarını düşük düzeyde artırıcı etkide bulunmuştur. Yenilenebilir enerji tüketiminin çoğu ülkede kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkide bulunması Ekolojik Modernleşme Teorisi (EMT) kapsamında düşünüldüğünde teoriyi doğrular nitelikte olduğu görölmektedir.

Dış ticaret değişkeni, ülkelerde kişi başına CO₂ emisyonları üzerinde hem artırıcı hem de azaltıcı etkiler sergilemiştir. Özellikle “ABD, İsrail, Fransa ve İsveç” gibi ülkelerde pozitif etki göstermektedir. Dış ticaretin karbon emisyonlarını artırıcı etkide bulunması sonucu Kesgingöz ve Karamelikli (2015), Wang ve Zhao (2015), Yılmaz ve Dilber (2020), ve Zeng ve Wang (2023)’ün çalışmalarından elde edilen sonuçları desteklemektedir. Öte yandan, analizler sonucunda “Çin, İspanya, İtalya, Macaristan, İsviçre, Japonya, Norveç, Avustralya” gibi bazı ülkelerde ise dış ticaretin emisyonları azaltıcı etkisi belirlenmiştir. Bu durum söz konusu ülkelerde Antweiler, Copeland ve Taylor (ACT) yaklaşımında belirtilen ticaretin daha temiz teknolojilerle yapılmasıyla birlikte çevresel verimliliğin artması gerektiği varsayımını destekler niteliktedir.

Doğrudan yabancı yatırımların kişi başına CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi ülkelerde değişiklik göstermekle birlikte sonuçlar sınırlı etkileri barındırmaktadır. “İsviçre, Hindistan, Finlandiya, Yunanistan, Meksika ve Hollanda” gibi ülkelerde azaltıcı yönde etki göstermiştir. Bu sonuç, Rahaman vd. (2022) ve Pata vd. (2023)’ün çalışmalarında elde ettiği bulguları ile örtüşmektedir. Buna karşılık “Brezilya, Endonezya ve Fas” gibi bazı ülkelerde DYY’nin sınırlı da olsa artırıcı etkisi, gerçekleşen yatırımların karbon yoğun sektörlerde yoğunlaştığını göstermektedir. Ayrıca DYY’nin artırıcı etki sergilediği gelişmekte olan ülkelerde Kirlilik Cenneti Hipotezi (KCH)’nin geçerli olabileceğini işaret etmektedir.

Ekonomik büyümenin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi, ülkeler arasında önemli farklılıklar göstermektedir. Özellikle “ABD, Norveç, Almanya, İsveç, İspanya, Fransa, Japonya ve Birleşik Krallık” gibi gelişmiş ülkelerde ekonomik büyüme kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı niteliktedir. Bu durum ülkelerde artık sürdürülebilir büyüme politikalarının yürütüldüğünü ve Çevresel Kuznet Eğrisi (ÇKE) ve Ekolojik Modernleşme Teorisi (EMT)’i destekler niteliktedir. Wu vd. (2015) ile Tutak ve Brodny (2022)’de çalışmalarında benzer sonuçları elde etmiştir. Öte yandan “Çin, Hindistan, Güney Afrika, Macaristan, Fas, Meksika, Şili, İsrail, İtalya ve Endonezya” gibi ülkelerde ekonomik büyüme, kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı yönde etkide

bulunmaktadır. Bu durum ise ülkelerde sürdürülebilir büyüme politikaları yerine halen fosil enerjiye bağımlı bir şekilde büyüme temeli benimsendiğini ve aynı zamanda Çevresel Kuznets Hipotezinde yer alan ilk aşamada olduklarını, büyümeyle birlikte CO₂ emisyonlarının arttığını göstermektedir. Ekonomik büyümenin CO₂ emisyonlarını artırıcı etkisini gösteren sonuçlar Begüm vd. (2015), Pata ve Yurtkuran (2018), Acheampong vd. (2021), Karimi vd. (2021), Li ve Haneklaus (2021), Kırıkkaleli vd. (2022), Hao ve Chen (2023)'ün çalışmalarında ortaya koydukları sonuçlar ile örtüşmektedir.

Kentleşme değişkeninin RECAI ülkeleri kapsamında yapılan analizler sonucunda birçok ülkede kişi başına CO₂ emisyonlarını azaltıcı nitelikte olduğu görülmüştür. Özellikle “İtalya, Fransa, Türkiye, Çin, Macaristan, Meksika, İspanya, Arjantin, Danimarka, İsrail, Güney Kore, Almanya, Kanada, Güney Afrika ve Avustralya” gibi ülkelerde kentleşmenin çevresel etkileri olumlu yöndedir. Sonuçlar, kentleşmenin planlı şekilde ilerlemesi, sürdürülebilir altyapı yatırımları ve çevreci ulaşım sistemlerinin yaygınlaşmasıyla ilişkilendirilebilir. Bulgular, nüfus, refah ve teknolojinin çevresel etkilerini ele alan STIRPAT modeli çerçevesinde değerlendirildiğinde, kentleşmenin uygun teknolojik tercihler ve politikalarla desteklenmesi halinde çevresel baskıları azaltabileceğini göstermektedir. Shafiei ve Salim (2014), Li ve Haneklaus (2021) ile Wei vd. (2023)'te çalışmalarında, kentleşmenin CO₂ emisyonlarını azalttığı sonucuna ulaşmışlardır. Buna karşılık “Fas, Mısır, Endonezya, ABD, Hollanda, Japonya ve İsviçre” gibi hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde kentleşme değişkeninin, kişi başına CO₂ emisyonlarını artırıcı yönde etkilediği belirlenmiştir. Bu durum, şehirleşmeyle birlikte enerji tüketiminin artışı, ulaşım nedeniyle fosil yakıtlara olan bağlılığın artması ya da gerekli çevreci sürdürülebilir şehirleşme planlamasının yapılmamasından kaynaklı olabilir. Kentleşmenin bazı ülkelerde emisyonları artırıcı nitelikteki sonuçları ise Cheng ve Hu (2023)'ün çalışmasının sonuçlarıyla uyumluluk sergilemektedir.

Çalışmada sonuç olarak kişi başına CO₂ emisyonlarını etkileyen faktörler, ülke düzeyinde farklılıklar sergilemektedir. Ülkeler, benzer kişi başına CO₂ emisyon seviyelerine göre kümelenmiş olsalar dahi bağımsız değişkenlerin etkisi, ülkelerin ekonomik yapıları, enerji politikaları, sanayi profilleri ve kentleşme stratejilerine bağlıdır. Bununla birlikte ülke sonuçları küme bazlı değerlendirildiğinde, aynı kümedeki ülkelerin çoğunluğunun bazı değişkenler üzerinde benzer sonuçlar ortaya

koyduğu ve kişi başına CO₂ emisyon seviyesi benzer olan ülkeler açısından genel bir değerlendirme yapma imkânı sunduğu tespit edilmiştir. Bu açıdan ülkelerde enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi, çevreci yatırımların teşvik edilmesi ve sürdürülebilir şehir planlamalarının yaygınlaştırılması ile CO₂ emisyonlarının azaltılmasının mümkün olacağı görülmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı ülke ya da ülke kümelerinin ele alınması, teknoloji kullanımı, eğitim düzeyi, çevresel düzenlemeler, siyasi istikrar, karbon vergisi, emisyon ticaret sistemleri ve yeşil finansman gibi bağımsız değişkenlerin analize dahil edilmesi ile CO₂ emisyon düzeyindeki etkileri incelenebilir. Bunun yanı sıra metodolojik açıdan farklı makine öğrenmesi yöntemleri kullanarak yapılacak analizlerle elde edilen bulguların, bu çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılması önerilmektedir. Ayrıca alışma, kentleşme ve ekonomik büyüme değişkenlerinin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisinin ülkelere göre farklılık göstermesi nedeniyle, iklim politikalarının sadece çevresel değil aynı zamanda sosyal boyutlarının da dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda benimsenebilecek çok boyutlu bir yaklaşım yalnızca karbon emisyonlarını azaltmaya değil, aynı zamanda bu sürecin toplumsal maliyetlerinin daha adil ve dengeli biçimde dağıtılmasına da katkı sağlayabilir. Böylelikle geliştirilecek iklim politikaları hem çevresel etkinlik hem de sosyal sürdürülebilirlik açısından daha uygulanabilir, kapsayıcı ve uzun vadede başarılı olma potansiyeline sahip olacaktır.



EXTENDED ABSTRACT

Analysis of Carbon Emission Determinants in Countries Covered by the Renewable Energy Country Attractiveness Index (RECAI) Using Machine Learning

Purpose: The main purpose of the study is to analyze the factors affecting per capita CO₂ emissions in countries included in the RECAI with machine learning methods. The study was carried out using the 1991-2023 period data for 32 countries included in the Renewable Energy Country Attractiveness Index (RECAI) and whose data were available. **Method:** In the study, the X-Means clustering algorithm and the SMOReg algorithm for Support Vector Regression were examined from machine learning methods. Firstly, the countries were divided into clusters according to similar per capita CO₂ emission levels with the X-Means clustering algorithm. In the second stage, the weight coefficients of the variables were calculated for each country in these clusters using the algorithm for support vector regression (SMOReg). The results were evaluated individually for each country. In the next stage, cluster-based evaluations were made based on the country results and general results were obtained about the countries clustered according to per capita CO₂ emissions. In the last stage, the general effect of growth and field independent variables on all clusters were examined and compared with other studies in the literature as well as in terms of theoretical approaches.

Findings: In the study, firstly, the X-Means clustering algorithm was used to divide the countries into four clusters as “high, medium-high, medium and low” CO₂ emission per capita countries. Cluster 0 represents the countries with high CO₂ emission per capita “USA, Australia and Canada”; Cluster 1 represents the countries with medium-high CO₂ emission per capita “United Kingdom, South Africa, South Korea, Germany, Belgium, Denmark, Finland, Netherlands, Ireland, Israel, Japan and Norway”; Cluster 2 represents the countries with medium CO₂ emission per capita “China, Spain, Italy, Greece, France, Sweden, Switzerland and Hungary” and finally Cluster 3 represents the countries with low CO₂ emission per capita “Argentina, Brazil, Indonesia, Morocco, Mexico, Egypt, Chile and Turkey, India”. In the next stage of the study, the weight coefficients of the variables were calculated and interpreted using the algorithm for support vector regression (SMOReg) for each country in these clusters.

In countries with high CO₂ emissions per capita in Cluster 0, the variable that increases CO₂ emissions per capita the most is fossil energy consumption; the variable that decreases them the most is renewable energy consumption. In the countries in this cluster, except for the USA, economic growth still has an increasing effect on CO₂ emissions. However, the fact that economic growth has a decreasing effect on CO₂ emissions in the USA shows that it has entered the inverted U-shaped cycle as in the Environmental Kuznets Curve. In Cluster 0, urbanization has increased CO₂ emissions in some countries and decreased them in some countries. This situation is an indication that urbanization policies and urbanization dynamics are different in different countries. When we look at the effects of foreign trade and foreign direct investment (FDI) on CO₂ emissions per capita, it can be said that the effect of the variables is limited and relatively low among countries for Cluster 0. These differences show that foreign trade and foreign direct investment, which have high CO₂ emissions per capita, are not variables that directly determine emission levels in developed countries.

In Cluster 1, the variable that increases the most is fossil energy consumption, while the variable that decreases the most is urbanization and renewable energy use follows urbanization. However, it is noteworthy that renewable energy has a limited, although increasing effect on CO₂ emissions in some countries, especially the United Kingdom, Germany and South Africa. The fact that foreign trade and foreign direct investment have a decreasing effect on emissions in some countries shows the importance of these variables in terms of environmental sustainability for those countries. The fact that economic growth has a decreasing effect on emissions in some developed countries, such as Germany and Norway, shows that the environmental effects of economic growth in these countries have now turned into an inverted U shape, as in the EEC hypothesis.

In Cluster 2, the variable that increases the most is fossil energy consumption, while the variables that decrease the most are urbanization, renewable energy consumption and foreign trade. When the results of Cluster 2 countries are examined together, it is seen that the variable that increases CO₂ emissions per capita the most is fossil energy consumption. It is seen that fossil energy consumption has a strong increasing power on CO₂ emissions per capita, especially in China, Spain, Italy, Greece, France, Sweden, Switzerland and Hungary. In Cluster 2, the economic growth variable increases CO₂ emissions per capita in countries such as China, Italy and Hungary, while it has a negative effect in Spain, France and Sweden. This situation shows that economic growth in these countries adopts a more environmentally friendly and low carbon intensity growth. As in the Environmental Kuznets Curve hypothesis, economic growth supports the decreasing trend of carbon emissions as it progresses. When Cluster 2 is examined in terms of renewable energy consumption; in most countries, especially in China, Spain, Switzerland, Hungary, it has been determined that it has a decreasing effect on emissions, but in countries such as Greece and Sweden, it has been determined that it increases CO₂ emissions per capita, albeit limited. The urbanization variable has a decreasing effect on CO₂ emissions per capita in most countries of Cluster 2, such as Italy, France, Spain, Hungary, China, and Greece. However, it has increased results, albeit limited, in Switzerland. The foreign trade variable has generally had a decreasing effect in Cluster 2 countries. This decreasing effect is quite impactful, especially in Hungary, China, and Greece. However, it has also increased results in some countries, especially in France and Sweden. The point to be noted here is that in foreign trade, emissions resulting from trade are not only responsible for the producer countries but also for the consumer countries. In countries with industrial intensive production, emissions released during production are transferred to importing countries as embedded carbon, and this situation shows that the emission burden should actually be considered for both parties. Foreign direct investments, on the other hand, have a reducing effect on emissions, especially in countries such as Switzerland and Greece in Cluster 2, but have limited effects in most countries. As a result, fossil energy consumption is the main factor that increases CO₂ emissions per capita in Cluster 2. The main factor that has a reducing effect is urbanization and then renewable energy and foreign trade.

In Cluster 3, the variable that increases the most is fossil energy consumption, while the variables that decrease the most are renewable energy consumption and urbanization. Cluster 3 still shows a large dependence on fossil resources in countries with low CO₂ emissions per capita. Renewable energy consumption and urbanization variables stand out as the variables that reduce CO₂ emissions per capita the most in this cluster. This result reveals the importance of sustainable energy and urbanization

practices in these countries. The effects of foreign trade and foreign direct investments, on the other hand, show different and limited effects from country to country. The economic growth variable, on the other hand, increases CO₂ emissions per capita in most of the Cluster 3 countries, indicating that growth still increases carbon emissions in these countries, that is, they have a carbon-intensive growth pattern.

Results and Discussion: As a result, when evaluated together in all countries in the clusters, it was determined that fossil energy consumption, which shows the most variability in per capita CO₂ emissions, increased. This result is read more clearly especially in frequencies such as “USA, Canada, Australia, China, India, Germany, United Kingdom, France, Mexico, South Africa, South Korea, Hungary, Argentina, Indonesia, Italy, Switzerland, Israel”. This result supports the results in the studies of Bölük and Mert (2014), Shafiei and Salim (2014), Inglesi-Lotz and Doğan (2018), Li and Haneklaus (2021), Chen et al. (2022), Itoo and Ali (2023), Karakurt and Aydın (2023), Kartal (2023), Yue and Bu (2023). According to the results obtained from all the countries in the study, the strong effect of fossil fuel consumption on per capita CO₂ emissions, indicating that the environmental damages will also increase. In this respect, it is necessary to determine the damages caused by this diverse fossil supply and to prevent this situation with implementations such as carbon tax regarding environmentally damaging practices as in the negative externality approach. The renewable energy consumption variable has been determined as a factor that reduces CO₂ emissions per capita in many countries. This effect, which is especially common in “USA, Canada, China, Turkey, Norway, Switzerland, Hungary, Spain, Argentina, Mexico, Egypt, Denmark, Israel and Chile”, is quite evident. This result is also consistent with the results of Shafiei and Salim (2014), Inglesi-Lotz and Doğan (2018), Liu and Bae (2018), Pata and Yurtkuran (2018), Li and Haneklaus (2021), Kırıkkaleli et al. (2022), Lei et al. (2022), Ahmed et al. (2022), Chen et al. (2022), Dong et al. (2022), Mentel et al. (2022), Hao and Chen (2023), Kartal (2023) and Pata et al. (2023). However, some (such as South Africa, the United Kingdom, Germany, Greece and Sweden) individual energy consumption has a limited, increasing effect on per capita CO₂ emissions. It should not be forgotten that this situation may be due to the carbon emissions that will occur during the operation of these power plants, especially the types of alternative energy used, where hydroelectric use is widespread. It is seen that renewable energy consumption has a decreasing effect on per capita CO₂ emissions in most countries, confirming the theory considered within the scope of the Ecological Modernization Theory (EMT). The foreign trade variable has frequently exhibited both increasing and decreasing effects on per capita CO₂ emissions. It has a positive effect especially in the types such as “USA, Israel, France and Sweden”. The results of the increasing effect of foreign trade on carbon emissions are provided by the studies of Kesgingöz and Karamelikli (2015), Wang and Zhao (2015), Yılmaz and Dilber (2020), Zeng and Wang (2023). On the other hand, as a result of the analyses, the reducing effect of foreign trade on emissions in some regions such as “China, Spain, Italy, Hungary, Switzerland, Japan, Norway, Australia” was determined. This situation supports the assumption that environmental efficiency should increase in these countries as trade with cleaner technologies, as stated in the Antweiler, Copeland and Taylor (ACT) approach. The impact of foreign direct investment on per capita CO₂ emissions varies across countries, but the results show limited effects. The reducing effect has been shown in a wide range such as “Switzerland, India, Finland, Greece, Mexico and the Netherlands”. This result is consistent with the findings of Rahaman et al. (2022) and Pata et al. (2023) in their studies. On the other hand, the limited, increasing effect of FDI in some countries such as “Brazil, Indonesia and

Morocco” indicates that the investments are concentrated in carbon-intensive sectors. It also indicates that the Pollution Haven Hypothesis (PHC) may be valid in developing countries where FDI has an increasing effect. The effect of economic growth on CO₂ emissions varies significantly across countries. In particular, economic growth in developed countries such as “USA, Norway, Germany, Sweden, Spain, France, Japan and the United Kingdom” has a nature that reduces CO₂ emissions per capita. This situation supports the fact that sustainable growth policies are now being implemented in countries and it supports the Environmental Kuznets Curve (EKC) and Ecological Modernization Theory (EMT). Similar results were obtained in the studies of Wu et al. (2015) and Tutak and Brodny (2022). On the other hand, economic growth in countries such as “China, India, South Africa, Hungary, Morocco, Mexico, Chile, Israel, Italy and Indonesia” has an effect on increasing CO₂ emissions per capita. This situation shows that instead of regular sustainable growth policies, a growth basis dependent on fossil energy is still adopted and at the same time, the basis in the first stage of the Environmental Kuznets Hypothesis is that CO₂ emissions increase with growth. The results showing the increasing effect of economic growth on CO₂ emissions are consistent with the results presented in the studies of Begüm et al. (2015), Pata and Yurtkuran (2018), Acheampong et al. (2021), Karimi et al. (2021), Li and Haneklaus (2021), Kırıkkaleli et al. (2022), Hao and Chen (2023). As a result of the analyses conducted within the scope of RECAI countries, it was observed that the urbanization variable reduces CO₂ emissions per capita in many countries. The environmental effects of urbanization are positive, especially in countries such as “Italy, France, Turkey, China, Hungary, Mexico, Spain, Argentina, Denmark, Israel, South Korea, Germany, Canada, South Africa and Australia”. The results can be associated with the planned progress of urbanization, sustainable infrastructure investments and the spread of environmentally friendly transportation systems. When the findings are evaluated within the framework of the STIRPAT model, which addresses the environmental effects of population, welfare and technology, it shows that urbanization can reduce environmental pressures if supported by appropriate technological choices and policies. Shafiei and Salim (2014), Li and Haneklaus (2021) ile Wei et al. (2023) concluded in their studies that urbanization reduces CO₂ emissions. On the other hand, it has been determined that the urbanization variable sometimes has an increasing effect on per capita CO₂ emissions in both developed and developing countries such as “Morocco, Egypt, Indonesia, USA, Netherlands, Japan and Switzerland”. This situation may be due to the increase in energy consumption with urbanization, the increase in dependence on fossil fuels due to transportation or the lack of necessary environmentally sustainable urbanization planning. The results of urbanization that increase emissions in some countries are consistent with the results of the study by Cheng and Hu (2023).

The study concludes that the factors affecting per capita CO₂ emissions vary across countries. Even when countries are clustered based on similar per capita CO₂ emission levels, the impact of independent variables depends on their economic structures, energy policies, industrial profiles, and urbanization strategies. However, when country results are evaluated cluster-by-cluster, it is determined that the majority of countries within the same cluster exhibit similar results on some variables, providing a general assessment of countries with similar per capita CO₂ emission levels. Therefore, it appears that reducing CO₂ emissions is possible by diversifying energy sources, encouraging environmental investments, and expanding sustainable urban planning.

Future studies could examine the effects of different countries or country clusters on CO₂ emission levels by including independent variables such as technology use, education level, environmental regulations, political stability, carbon taxes, emissions trading systems, and green financing in the analysis. Furthermore, it is recommended that the findings obtained from analyses using different methodological machine learning methods could be compared with the results of this study. In addition, the study reveals that not only the environmental but also the social dimensions of climate policies should be taken into account, as the impact of urbanization and economic growth variables on CO₂ emissions varies by country. A multidimensional approach to this end could contribute not only to reducing carbon emissions but also to a more equitable and balanced distribution of the social costs of this process. Thus, the resulting climate policies will be more applicable, inclusive, and have the potential to be successful in the long term, both in terms of environmental effectiveness and social sustainability.





KAYNAKÇA

- Acheampong, A. O., Dzator, J., & Savage, D. A. (2021). Renewable energy, CO₂ emissions and economic growth in sub Saharan Africa: Does institutional quality matter? *Journal of Policy Modeling*, 43(5), 1070-1093. <https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2021.03.011>.
- Agarwal, K., Uniyal, P., Virendrasingh, S., Krishna, S., & Dutt, V. (2021). Spam mail classification using ensemble and non ensemble machine learning algorithms. In *Machine learning for predictive analysis: Proceedings of ICTIS 2020* (pp. 179–189). Springer Singapore.
- Aggarwal, P., & Jain, S. (2016). Energy demand and CO₂ emissions from urban on-road transport in Delhi: Current and future projections under various policy measures. *Journal of Cleaner Production*, 128, 48-61. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.012>.
- Ahmed, M., Shuai, C., & Ahmed, M. (2022). Influencing factors of carbon emissions and their trends in China and India: A machine learning method. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-14.
- Alashan, S., Şen, Z., & Toprak, Z. F. (2016). Hydroelectric energy potential of Turkey: A refined calculation method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 1511-1520.
- Alawadhi, S., Aldama-Nalda, A., Chourabi, H., Gil-Garcia, J. R., Leung, S., Mellouli, S., ... & Walker, S. (2012, September). Building understanding of smart city initiatives. In *International Conference on Electronic Government* (pp. 40-53). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Albayrak, S., & Turanlı, M. (2022). Çok kriterli karar verme yöntemleri ile Türkiye’de HES (hidroelektrik santral) seçimi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 21(41), 68-79. <https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1113158>.
- Alptekin, B. (2024). Karbon vergisi ve yenilenebilir enerji teşvikleri: İkili politikaların etkinliği. *Ekonomim*. <https://www.ekonomim.com/kose-yazisi/karbon-vergisi-ve-yenilenebilir-enerji-tesvikleri-ikili-politikalarin-etkinligi/750388>.
- Alsagr, N., Ozturk, I., & Usman, A. (2025). Digital government, political stability, and nuclear energy investment: The role of the Paris agreement. *Nuclear Engineering and Technology*, 57(5), 103350.
- Antweiler, W., Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2001). Is free trade good for the environment? *American Economic Review*, 91(4), 877-908.
- Appiah, K., Du, J., Appah, R., & Quacoe, D. (2018). Prediction of potential carbon dioxide emissions of selected emerging economies using artificial neural network. *Changes*, 14, 321-335. doi:10.17265/2162-5298/2018.08.003.
- Arık, O. A., & Hamamcıoğlu, E. (2024). Türkiye’nin CO₂ emisyonunun ANFIS ile tahmin edilmesi. *Researcher*, 4(2), 141-156.
- Arıkan, Y. (2006). Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve Kyoto Protokolü: Metinler ve temel bilgiler. *Bölgesel Çevre Merkezi (REC) Türkiye*. http://iklim.cob.gov.tr/iklim/Files/REC_unfccc.pdf.

- Asian Transport Outlook. (2024). *Indonesia: Transport and climate policy*. Asian Development Bank. <https://asiantransportobservatory.org/documents/204/Indonesia-transport-and-climate-policy.pdf>.
- Atılgan, D. (2025). Çevre vergisi karbon emisyonlarını azaltmakta mı? Panel eşbütünleşme analizi. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 12(1), 145-156. <https://doi.org/10.30910/turkjans.1586719>.
- Austin, G. (2013). Case study and sustainability assessment of Bo01, Malmö, Sweden. *Journal of Green Building*, 8(3), 34-50.
- Austrade. (2023). *Australia ranked third globally for attracting FDI in renewables*. Australian Trade and Investment Commission. Erişim tarihi: 16 Ağustos 2025, <https://international.austrade.gov.au/en/news-and-analysis/news/australia-ranked-third-globally-for-attracting-fdi-in-renewables>.
- Aydemir, E. (2019). *Weka ile yapay zeka* (2. Baskı). Seçkin Yayınevi.
- Aydın, C. (2018). Makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak itfaiye istasyonu ihtiyacının sınıflandırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (14), 169-175.
- Aydın, C., Darıcı, B., & Şahin Kutlu, Ş. (2019). Ekonomik büyüme çevre kirliliğini azaltır mı? *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(2), 191-196.
- Aydın, İ. (2013). Balıkesir’de rüzgâr enerjisi. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 18(29), 29-50.
- Aydın, M., & Değirmenci, T. (2021). Ekonomik büyüme, inovasyon, verimlilik ve yenilenebilir enerji tüketiminin çevre kirliliği üzerine etkisi: Türkiye için çevresel Kuznets hipotezinin analizi. *Düzce İktisat Dergisi*, 2(2), 138-151.
- Aydoğdu, Ç. (2021). Yenilenebilir enerji sektöründe ve enerji verimliliğinde kamusal destekler ve Türkiye’de yansımaları. *Akademik İzdüşüm Dergisi*, 6(1), 52-74.
- Baek, J. (2016). Do nuclear and renewable energy improve the environment? Empirical evidence from the United States. *Ecological Indicators*, 66, 352-356.
- Bagher, A. M., Vahid, M., Mohsen, M., & Parvin, D. (2015). Hydroelectric energy advantages and disadvantages. *American Journal of Energy Science*, 2(2), 17-20.
- Bahar, O. (2005). Türkiye’de enerji sektörü üzerine bir değerlendirme. *Muğla Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 14, 35–59.
- Bajja, S., Radoine, H., Abbas, S., Dakyaga, F., & Chenal, J. (2023). Determinants of urban environmental quality in Morocco: The roles of energy consumption, urbanization, manufacturing, and financial development in achieving SDG 13. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1174439.
- Bakay, M. S., & Ağbulut, Ü. (2021). Electricity production based forecasting of greenhouse gas emissions in Turkey with deep learning, support vector machine and artificial neural network algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 285, 125324. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125324>Get rights and content.
- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1-2), 3-65.

- Bardi, W., & Hfaiedh, M. A. (2021). Causal interaction between FDI, corruption and environmental quality in the MENA region. *Economies*, 9(1), 14. <https://doi.org/10.3390/economies9010014>.
- Başoğlu, A. (2018). STIRPAT modeli kapsamında Türkiye’de ekolojik ayak izinin belirleyicileri. *İktisat Seçme Yazılar*, 133-155.
- Beck, U., & Kruse-Andersen, P. K. (2020). Endogenizing the cap in a cap-and-trade system: Assessing the agreement on EU ETS phase 4. *Environmental and Resource Economics*, 77(4), 781-811.
- Begüm, R. A., Sohag, K., Abdullah, S. M. S., & Jaafar, M. (2015). CO₂ emissions, energy consumption, economic and population growth in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 594-601.
- Bekar, N. (2020). Yenilenebilir enerji kaynakları açısından Türkiye’nin enerji jeopolitiği. *Türkiye Siyaset Bilimi Dergisi*, 3(1), 37-54.
- Belli, A., & Çelik, Z. E. (2022). Sürdürülebilir çevre örneği: Türkiye’de yavaş şehirler (cittaslow). *Birey ve Toplum Sosyal Bilimler Dergisi*, 12(1), 63-89.
- Benli, Y., & Peker, H. S. (2018). Elektrik tüketimi, CO₂ emisyonu ve kişi başı gayrisafi yurtiçi hasıla arasındaki ilişkinin incelenmesi. In A. Yalçın (Ed.), *Akademisyen* (1. baskı). Akademisyen Kitabevi.
- Berner, R. A. (1999). A new look at the long-term carbon cycle. *GSA Today*, 9(11), 1-6.
- Biabany Khameneh, K., Najarzadeh, R., Dargahi, H., & Agheli, L. (2021). The role of global value chains in carbon intensity convergence: A spatial econometrics approach. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org>.
- Borne, I., Souza, S. A. S. D., Carniatto Silva, E. T., Soares, G. B., Gimenez Ledesma, J. J., & Ando Junior, O. H. (2025). Sustainable mobility: Analysis of the implementation of electric bus in university transportation. *Energies*, 18(9), 2195. <https://doi.org/10.3390/en18092195>.
- Bozkurt, C., & Okumuş, İ. (2015). Türkiye’de ekonomik büyüme, enerji tüketimi, ticari serbestleşme ve nüfus yoğunluğunun CO₂ emisyonu üzerindeki etkileri: Yapısal kırılmalı eşbütünleşme analizi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 12(32), 23-35.
- Bölük, G., & Mert, M. (2014). Fossil & renewable energy consumption, GHGs (greenhouse gases) and economic growth: Evidence from a panel of EU (European Union) countries. *Energy*, 74, 439-446.
- Bureau of Economic Analysis (BEA). (2024, July 23). *Direct investment by country and industry, 2023* [Press release]. U.S. Department of Commerce. <https://www.bea.gov/news/2024/direct-investment-country-and-industry-2023>.
- Catuti, M., Kustova, I., & Egenhofer, C. (2020). Delivering the European Green Deal for southeast Europe: Do we need a regional approach? *CEPS Research Paper*, 17 June 2020.
- Centraal Bureau voor de Statistiek. (2024). *Dutch trade in facts and figures 2024: Exports, imports & investment-Foreign direct investment and multinationals*. Erişim Tarihi: 17 Ağustos 2025, <https://longreads.cbs.nl/dutch-trade-in-facts-and-figures-2024/foreign-direct-investment-and-multinationals/>.

- Chen, C., Pinar, M., & Stengos, T. (2022). Renewable energy and CO₂ emissions: New evidence with the panel threshold model. *Renewable Energy*, 194, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.095>.
- Cheng, Z., & Hu, X. (2023). The effects of urbanization and urban sprawl on CO₂ emissions in China. *Environment, Development and Sustainability*, 25(2), 1792-1808.
- Churkina, G. (2008). Modeling the carbon cycle of urban systems. *Ecological Modelling*, 216(2), 107-113.
- Colaço, R., & de Abreu e Silva, J. (2025). Does the 15-minute city promote sustainable travel? Quantifying the 15-minute city and assessing its impact on individual motorized travel, active travel, public transit ridership and CO₂ emissions. *Networks and Spatial Economics*, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s11067-025-09670-6>.
- Commoner, B., Corr, M., & Stamler, P. J. (1971). The causes of pollution. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 13(3), 2-19.
- Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2004). Trade, growth, and the environment. *Journal of Economic Literature*, 42(1), 7-71.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20, 273-297.
- Cowan, W. N., Chang, T., Inglesi-Lotz, R., & Gupta, R. (2014). The nexus of electricity consumption, economic growth and CO₂ emissions in the BRICS countries. *Energy Policy*, 66, 359-368.
- Cömertler, S. (2017). 2010–2018 Avrupa yeşil başkentleri. *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1(1), 41-56.
- Çakmak, H. (2018). *Çevresel vergilerin ekonomik etkileri: Karbon vergisi* [Doktora tezi]. Maltepe Üniversitesi.
- Çelikkaya, A. (2024). Türkiye'nin karbon fiyatlandırma politikasının yeniden gözden geçirilmesi. *Maliye Çalışmaları Dergisi*, (71), 15-27. DOI: 10.26650/mcd2023-1453538.
- Çelikkol, H., & Özkan, N. (2015). Karbon piyasaları ve Türkiye perspektifi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (31), 203-222.
- Çetin, M., & Saygın, S. (2019). Çevresel Kuznets Eğrisi hipotezi'nin ampirik analizi: Türkiye ekonomisi örneği. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 26(2), 529-546.
- Çınar, M. (2023). Yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları ile ekonomik büyüme arasındaki nedensel ilişkinin araştırılması. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(1), 24-56. doi: 10.18074/ckuiibfd.1146332.
- Çıtak, F., Uslu, H., Batmaz, O., & Hoş, S. (2021). Do renewable energy and natural gas consumption mitigate CO₂ emissions in the USA? New insights from NARDL approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-12.
- Çoban, O., & Şahbaz Kılınç, N. (2015). Yenilenebilir enerji tüketimi ve karbon emisyonu ilişkisi: TR örneği. *Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 38(1), 195-208.

- Çoban, O., & Şahbaz Kılınç, N. (2016). Enerji kullanımının çevresel etkilerinin incelenmesi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 33, 589-606.
- Çömert, R., Bilget, Ö., & Çabuk, A. (2015). Kyoto Protokolüne imza atan G20 ülkelerinin yıllara göre karbon salınımlarının (1990-2012) Coğrafi Bilgi Sistemleri yardımı ile analizi. *Anadolu Üniversitesi, Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü*, 883-891.
- Dam, M. M. (2014). *Sera gazı emisyonlarının makroekonomik değişkenlerle ilişkisi: OECD ülkeleri için panel veri analizi* [Doktora tezi]. Adnan Menderes Üniversitesi.
- De Beer, S. (2016). The 'good city' or 'post-colonial catch-basins of violent empire'? A contextual theological appraisal of South Africa's Integrated Urban Development Framework. *HTS: Theological Studies*, 72(4), 1-13.
- De Haas, M. (2023). *What happened to public transport passengers?* Netherlands Institute for Transport Policy Analysis (KiM). <https://english.kimnet.nl/publications/publications/2023/11/02/what-happened-to-public-transport-passengers>.
- Demir, A. (2022). Paris Anlaşması ve 26. Taraflar Konferansı (COP 26)'nda Türkiye değerlendirmesi: Yükümlülükler ve sorumluluklar. *Biological Diversity and Conservation*, 15(2), 162-170. DOI: 10.46309/biodicon.2022. 1088410.
- Demirtaş, I. (2023). OECD ülkeleri için çevresel Kuznets Eğrisi (EKC)'nin geçerliliğine ilişkin bir analiz. *Uluslararası Akademik Birikim Dergisi*, 6(Özel Sayı). Doi: 10.5281/zenodo.10003950.
- Desthieux, G., & Joerin, F. (2022). Urban planning in Swiss cities has been slow to think about climate change: Why and what to do? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 12(4), 692-713. <https://doi.org/10.1007/s13412-022-00767-9>.
- Diaz-Sarachaga, J. M. (2024). May urban digital twins spur the New Urban Agenda? The Spanish case study. *Sustainable Cities and Society*, 114, 105788. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105788>.
- Dietz, T., & Rosa, E. A. (1997). Effects of population and affluence on CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(1), 175-179.
- Diker, B. (2019). Kentsel dönüşümde çevresel sürdürülebilirlik üzerine bir araştırma: Fikirtepe örneği. *İdealkent*, 10(27), 594-629. DOI:10.31198/idealkent.545058.
- Dirik, R., Taşkesen, E., & Dirik, Ö. (2023). Yenilenebilir enerji kaynaklarında yapay zekâ kullanımı. In *International Conference on Recent Academic Studies* (Vol. 1, ss. 28-35).
- Disli, M., Ng, A., & Askari, H. (2016). Culture, income, and CO₂ emission. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 418-428. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.053>.
- Dong, F., Li, Y., Gao, Y., Zhu, J., Qin, C., & Zhang, X. (2022). Energy transition and carbon neutrality: Exploring the non-linear impact of renewable energy development on carbon emission efficiency in developed countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 106002. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106002>.

- Doussard, C., & Fonticelli, C. (2022). Ecologizing planning policies and practices in France: Insights from peri-urban and rural EcoQuartier certified neighborhoods. *Environmental Science & Policy*, 136, 588-598.
- Du, J., Li, F., Li, J., Wu, X., Song, Z., Zou, Y., & Ouyang, M. (2019). Evaluating the technological evolution of battery electric buses: China as a case. *Energy*, 176, 309-319. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.084>Get rights and content.
- Dulkadiroğlu, H. (2018). Türkiye’de elektrik üretiminin sera gazı emisyonları açısından incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 67-74. doi: 10.28948/ngumuh.369948.
- Dünya Bankası. (t.y.). *World Development Indicators*. Dünya Bankası. Erişim tarihi: Ocak 2025, <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>
- Eckhardt, C. M., Madjarova, S. J., Williams, R. J., Ollivier, M., Karlsson, J., Pareek, A., & Nwachukwu, B. U. (2023). Unsupervised machine learning methods and emerging applications in healthcare. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 31(2), 376-381. <https://doi.org/10.1007/s00167-022-07233-7>.
- Ehrlich, P. R., & Holdren, J. P. (1971). Impact of population growth. *Science*, 171(3977), 1212-1217.
- El Atmani, H., Bajja, N., & Chakor, A. (2025). The environmental impact of foreign direct investment in Morocco: Policies, trends, and sustainability outcomes. *Contemporary World Sustainable Policy*, 3(1), 45-62. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15244054>.
- El Khattabi, M. Z., El Jai, M., Lahmadi, Y., Oughdir, L., & Rahhali, M. (2024). Understanding the interplay between metrics, normalization forms, and data distribution in K-means clustering: A comparative simulation study. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(3), 2987-3007. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07741-9>.
- Elibüyük, U., & Üçgöl, İ. (2014). Rüzgâr türbinleri, çeşitleri ve rüzgâr enerjisi depolama yöntemleri. *Yekarum*, 2(3).
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748-764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>Get rights and content.
- Elmas, Y. (2016). *Gelirden payı artan ülkelerde ticaretin karbondioksit emisyonlarına etkisi* [Doktora tezi]. Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi.
- Erdoğan, İ., Türköz, K., & Görüş, M. Ş. (2015). Çevresel Kuznets eğrisi hipotezinin Türkiye ekonomisi için geçerliliği. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (44), 11-25.
- Ergül, H. A. (2025). Biyolojik çeşitlilik, sürdürülebilirlik ve Kocaeli örneği. *Şura Akademi*, (8 ÇEVRE), 37-42.
- Ernst & Young (EY). (2022). *RECAI: 58th edition top 40 ranking - October 2021*. <https://www.ey.com/content/dam/ey-unified-site/ey-com/tr-tr/insights/recai/documents/ey-recai-58th-edition-october-2021-eyg-no-008578-21gbl-final1.pdf>.

- European Commission. (t.y.). *European Green Deal*. European Commission. Erişim tarihi: Aralık 2024, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.
- Ewing, J. A. (2017). Hollow ecology: Ecological modernization theory and the death of nature. *Journal of World-Systems Research*, 23(1), 126-155.
- Fadhilah, R., Matdoan, M. Y., Safira, D. A., & Tahalea, S. P. (2024). Clustering shrimp distribution in Indonesia using the X-means clustering algorithm. *Variance: Journal of Statistics and Its Applications*, 6(1), 49-54.
- Fan, X., Shen, X., Wang, D., & Zhou, C. (2025). The Paris Agreement and firms' carbon information disclosure: Honesty or catering? *International Review of Economics & Finance*, 99, 103988. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2025.103988>.
- Fan, Y., Liu, L. C., Wu, G., & Wei, Y. M. (2006). Analyzing impact factors of CO₂ emissions using the STIRPAT model. *Environmental Impact Assessment Review*, 26(4), 377-395.
- Field, C. B., Campbell, J. E., & Lobell, D. B. (2008). Biomass energy: The scale of the potential resource. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(2), 65-72.
- Flotve, B. L., & Farstad, E. (2022). *Transport volumes in Norway 1946–2021* (TØI Report 1929/2022) [Summary PDF]. Institute of Transport Economics. https://www.toi.no/getfile.php/1374607-1673018346/Publikasjoner/T%C3%98I%20rapporter/2022/1929-2022/1929-2022_Summary.pdf.
- Frades, I., & Matthiesen, R. (2009). Overview on techniques in cluster analysis. In *Bioinformatics methods in clinical research* (81-107).
- Fu, X., Zheng, Q., Jiang, G., Roy, K., Huang, L., Liu, C., ... & Wang, Z. (2023). Water quality prediction of copper-molybdenum mining-beneficiation wastewater based on the PSO-SVR model. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 17(8), 98. <https://doi.org/10.1007/s11783-023-1698-9>.
- Furmoly, H. (2015). *Doğrudan yabancı yatırımların ekonomik büyümeye etkileri: Hindistan ekonomisi üzerine ampirik bir inceleme* [Yüksek lisans tezi]. Ankara Üniversitesi.
- Gergin, E. D. (2024). İklim değişikliğine dirençli kentler: Dünya’da ve Türkiye’de iyi yerel yönetim uygulama örnekleri. *Erzurum Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (18), 94-111. DOI: 10.29157/etusbed.1264447.
- Germany Trade & Invest (GTAI). (2025). *Study shows crisis-resistant Germany remaining top FDI destination*. Erişim tarihi: 16 Ağustos 2025, <https://www.gtai.de/en/meta/press/study-shows-crisis-resistant-germany-remaining-top-fdi-destination--1896594>.
- Górka, M. (2024). The idea of smart city in the perspective of the development of the capitals of the Visegrad Group countries. *Nowa Polityka Wschodnia*, 40(1), 86-113. DOI: 10.15804/npw20244005.
- Government of Canada. (2025). *Goal 11 of the Federal sustainable development strategy*. Environment and Climate Change Canada. Erişim tarihi: 16 Ağustos 2025, <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/federal-sustainable-development-strategy/goals/sustainable-cities-communities.html>.

- Government of Ireland. (2025). Government supported nearly 54,000 home energy upgrades through SEAI in 2024 [Press release]. *Department of the Environment, Climate and Communications*. Erişim tarihi: 16 Ağustos 2025, <https://www.gov.ie/en/department-of-climate-energy-and-the-environment/press-releases/government-supported-nearly-54000-home-energy-upgrades-through-seai-in-2024/>.
- Government of Israel. (2025). *Infrastructure for growth 2025* [PDF]. <https://www.ice.it/it/sites/default/files/inline-files/Infrastructure%20for%20Growth%202025%20En.pdf>.
- Govindarajan, H. K., & Ganesh, L. S. (2021). Renewable energy for electricity use in India: Evidence from India's smart cities mission. *Renewable Energy Focus*, 38, 36-43.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). *Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement* (NBER Working Paper No. 3914). National Bureau of Economic Research.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377.
- Guan, X., Wang, J., & Xiao, F. (2021). Sponge city strategy and application of pavement materials in sponge city. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127022>.
- Guerra, F., Roy, S., Muñoz Rosas, L., & Sandholz, S. (2025). Mindset shifts and sustainability transformation journeys across Urban Labs in Latin America. *Urban Transformations*, 7(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s42854-025-00078-6>.
- Gülçur, N. S. (2012). *Ecological modernization: Could it be the solution for the global environmental problems?* [Yüksek lisans tezi]. Marmara Üniversitesi.
- Hacıımamoğlu, T., & Sandalcılar, A. R. (2021). RECAI ülkelerinde ekonomik istikrar ve enerji tüketimi ilişkisi: Bootstrap panel nedensellik analizi. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, (33), 1-18.
- Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2011). *Data mining: Concepts and techniques* (3rd ed.). Morgan Kaufmann.
- Hao, Y., & Chen, P. (2023). [Retracted article] Do renewable energy consumption and green innovation help to curb CO₂ emissions? Evidence from E7 countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(8), 21115-21131.
- Hasanov, F. J., Mukhtarov, S., Suleymanov, E., & Shannak, S. D. (2024). The role of renewable energy and total factor productivity in reducing carbon emissions: A case of top-ranked nations in the renewable energy country attractiveness index. *Journal of Environmental Management*, 361, 121220. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121220>.
- Heinonen, S., Karjalainen, J., Helle, A., & Nisula, S. (2016). *Argentinian energy landscapes. Case study of the Neo-Carbon Energy Project*. Finland Futures Research Centre eBook, 12.
- Hernandez, C., & Vita, G. (2022). Carbon footprint analysis of household consumption in Greater Guadalajara reveal stark socio-spatial inequalities. *Ecological Economics*, 199, 107495. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107495>.

- Hirvonen, J., & Kosonen, R. (2020). Waste incineration heat and seasonal thermal energy storage for promoting economically optimal net-zero energy districts in Finland. *Buildings*, 10(11), 205. <https://doi.org/10.3390/buildings10110205>.
- Hotunluoğlu, H., & Tekeli, R. (2007). Karbon vergisinin ekonomik analizi ve etkileri: Karbon vergisinin emisyon azaltıcı etkisi var mı? *Sosyoekonomi*, 6(6). <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sosyoekonomi/issue/21066/226821>.
- Huber, J. (2000). Towards industrial ecology: Sustainable development as a concept of ecological modernization. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 2(4), 269–285.
- Hudson, L., Wolff, A., Gooch, D., Van Der Linden, J., Kortuem, G., Petre, M., ... & O'Connor-Gotra, S. (2019). Supporting urban change: Using a MOOC to facilitate attitudinal learning and participation in smart cities. *Computers & Education*, 129, 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.10.012>.
- Hunter, D. B., Salzman, J. E., & Zaelke, D. (2021). *Glasgow climate summit: COP26* (UCLA School of Law, Public Law Research Paper No. 22-02).
- Inglesi-Lotz, R., & Dogan, E. (2018). The role of renewable versus non-renewable energy to the level of CO₂ emissions: A panel analysis of sub-Saharan Africa's big 10 electricity generators. *Renewable Energy*, 123, 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.041>Get rights and content.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2025a). *Renewable capacity highlights 2025*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Highlights_2025.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2025b). *Renewable energy capacity statistics 2025*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Statistics_2025.pdf.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2025c). *Renewable energy time series data*. Tableau Public. https://irena.sharepoint.com/:x:/s/statistics-public/EZir9y4VamRNvPDFCpuxSIUB62N4Uf_RyalVGybcUS-9kw?e=PbzzLA&wdLOR=cA18F0D42-601B-B648-B845-A3D624F3F0EC.
- International Trade Administration. (2023, December 7). *Chile – Mining*. In *Country Commercial Guide: Chile*. U.S. Department of Commerce. <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/chile-mining>.
- Irmak, M. A., & Avcı, B. (2019). Avrupa yeşil başkentlerin yeşil alan politikalarının incelenmesi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 1-19.
- Ito, H. H., & Ali, N. (2023). Analyzing the causal nexus between CO₂ emissions and its determinants in India: Evidences from ARDL and EKC approach. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 34(1), 192-213.
- Jablonski, M., Jablonski, M., Markovič, P., & Hitka, M. (2025). Climate-resilient building, municipal heat planning, and the contribution of district heating. In *Developments in information and knowledge management systems for business applications: Volume 8* (ss. 517-531). Cham: Springer Nature Switzerland.

- Jänicke, M. (1985). *Preventive environmental policy as ecological modernization and structural policy* (Discussion Paper No. IIUG dp 85 2). Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung.
- Japan External Trade Organization (JETRO). (2024). *Invest Japan Report 2024*. https://www.jetro.go.jp/en/invest/investment_environment/ijre/report2024/ch2/sec3.html.
- Javed, A., Rapposelli, A., Shah, M., & Javed, A. (2023). Nexus between energy consumption, foreign direct investment, oil prices, economic growth, and carbon emissions in Italy: Fresh evidence from autoregressive distributed lag and wavelet coherence approach. *Energies*, 16(16), 5885. <https://doi.org/10.3390/en16165885>.
- Jeong, K., Koo, C., & Hong, T. (2014). An estimation model for determining the annual energy cost budget in educational facilities using SARIMA (seasonal autoregressive integrated moving average) and ANN (artificial neural network). *Energy*, 71, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.027>.
- Jiang, W. (2021). Applications of deep learning in stock market prediction: Recent progress. *Expert Systems with Applications*, 184, 115537. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115537>.
- Jiang, X., & Lu, S. (2025). Prediction of peak path of building carbon emissions based on the STIRPAT model: A case study of Guangzhou City. *Energies*, 18(7), 1633. <https://doi.org/10.3390/en18071633>.
- Jin, R. (2025). Research on influencing factors of regional tourism carbon emission based on LMDI model. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 28(1-3), 61-75. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2025.144502>.
- Jin, T., & Kim, J. (2018). What is better for mitigating carbon emissions—Renewable energy or nuclear energy? A panel data analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 464-471. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.022>.
- Joiner, E., & Toman, M. A. (2023). Agricultural greenhouse gas emissions 101. *Resources for the Future*. <https://www.rff.org/publications/explainers/agricultural-greenhouse-gas-emissions-101/>.
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894-900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>.
- Kadhim, A. I. (2019). Survey on supervised machine learning techniques for automatic text classification. *Artificial Intelligence Review*, 52(1), 273-292. <https://doi.org/10.1007/s10462-018-09677-1>.
- Kaman, D., & Bozkurt, Y. (2025). Sürdürülebilir kalkınma ve çevre: Geleceği şekillendirecek stratejiler. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (83), 299-316. DOI: 10.51290/dpusbe.1581194.
- Karademir, A. Ç., & Dağ, A. (2021). Sürdürülebilirlik uygulaması olarak yeşil bina ve LEED sertifikasyonu üzerine Türkiye’de inşaat sektöründe bir çalışma. *Akademia Doğa ve İnsan Bilimleri Dergisi*, 7(1), 63-83.

- Karakaya, E. (2016). Paris İklim Anlaşması: İçeriği ve Türkiye üzerine bir değerlendirme. *Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 1-12.
- Karakaya, E., & Özçağ, A. G. M. (2001). Sürdürülebilir kalkınma ve iklim değişikliği: Uygulanabilecek iktisadi araçların analizi. In *First Conference in Fiscal Policy and Transition Economies*. University of Manas.
- Karakaya, E., Akkoyun, G., & Hiçyılmaz, B. (2023). Sera gazı emisyonu azaltımı için karbonun fiyatlanması: Karbon vergisi mi emisyon ticareti mi? *Ekonomi Politika ve Finans Araştırmaları Dergisi*, 8(4), 813-841. <https://doi.org/10.30784/epfad.1367596>.
- Karakurt, I., & Aydın, G. (2023). Development of regression models to forecast the CO₂ emissions from fossil fuels in the BRICS and MINT countries. *Energy*, 263, 125650. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125650>.
- Karimi, M. S., Ahmad, S., Karamelikli, H., Dinç, D. T., Khan, Y. A., Sabzehei, M. T., & Abbas, S. Z. (2021). Dynamic linkages between renewable energy, carbon emissions and economic growth through nonlinear ARDL approach: Evidence from Iran. *PLOS ONE*, 16(7), e0253464. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258612>.
- Kartal, M. T. (2023). Production-based disaggregated analysis of energy consumption and CO₂ emission nexus: Evidence from the USA by novel dynamic ARDL simulation approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(3), 6864-6874. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22714-5>.
- Kavas, Y. B., & Çoban, M. N. (2023). Finansal gelişmenin yenilenebilir enerji tüketimine etkisinin toplamsal olmayan sabit etkili panel kantil yöntemiyle analizi: CIVETS ülkelerinden ampirik kanıtlar. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 18(69), 60-78.
- Kavitha, S., Varuna, S., & Ramya, R. (2016, November). A comparative analysis on linear regression and support vector regression. In *2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)* (pp. 1-5). IEEE.
- Kavzoğlu, T., & Çölkesen, İ. (2010). Destek vektör makineleri ile uydu görüntülerinin sınıflandırılmasında kernel fonksiyonlarının etkilerinin incelenmesi. *Harita Dergisi*, 144(7), 73-82.
- Keller, D. P., Lenton, A., Littleton, E. W., Oschlies, A., Scott, V., & Vaughan, N. E. (2018). The effects of carbon dioxide removal on the carbon cycle. *Current Climate Change Reports*, 4(3), 250-265. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0104-3>.
- Kesgingöz, H., & Karamelikli, H. (2015). Dış ticaret-enerji tüketimi ve ekonomik büyümenin CO₂ emisyonu üzerine etkisi. *Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9(3), 7-17.
- Khaled, A. Y., Kabutey, A., Selvi, K. Ç., Mizera, Č., Hrabě, P., & Herák, D. (2020). Application of computational intelligence in describing the drying kinetics of persimmon fruit (*Diospyros kaki*) during vacuum and hot air drying process. *Processes*, 8(5), 544.

- Kharecha, P. A., & Sato, M. (2019). Implications of energy and CO2 emission changes in Japan and Germany after the Fukushima accident. *Energy Policy*, 132, 647-653. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.05.057>.
- Kılıç, F. Ç. (2015). Güneş enerjisi, Türkiye'deki son durumu ve üretim teknolojileri. *Mühendis ve Makina*, 56(671), 28-40.
- Kırman, A., & Kesbiç, C. Y. (2020). Validity of Environmental Kuznets Curve in rising market economies. *SSRJ|Social Sciences Research Journal*, 9(03), 93-104.
- Kirikaleli, D., Güngör, H., & Adebayo, T. S. (2022). Consumption-based carbon emissions, renewable energy consumption, financial development and economic growth in Chile. *Business Strategy and the Environment*, 31(3), 1123-1137. <https://doi.org/10.1002/bse.2945>.
- Kirmani, F., Pal, A., Mudgal, A., Shrestha, A., & Siddiqui, A. (2021). Advantages and disadvantages of hydroelectric power plant. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 6(7), 715-718.
- Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., & Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye'de enerji görünümünün genel değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(692), 86-114.
- Koç, E., & Kaya, K. (2015). Enerji kaynakları - yenilenebilir enerji durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47.
- Koçum, M., & Güneren Genç, E. (2023). Uluslararası ticaretin sera gazı emisyonundaki etkisi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 22(2), 1025-1051. doi: 10.46928/iticusbe.1293446.
- Konak, N. (2011). Küresel iklim değişikliği, Kyoto Protokolü esneklik mekanizmaları, gönüllü karbon piyasası ve Türkiye: Eleştirel yaklaşım. *Alternatif Politika*, 3(2), 154-178.
- Kong, D., Dai, Z., Tang, J., & Zhang, H. (2023). Forecasting urban carbon emissions using an Adaboost-STIRPAT model. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1284028. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1284028>.
- Kulasekara, H., & Seynlabdeen, V. (2019, September). A review of geothermal energy for future power generation. In *2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)* (pp. 223-228). IEEE.
- Kumar, P., & Wasan, S. K. (2010, February). Analysis of X-means and global k-means using tumor classification. In *2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)* (Vol. 5, pp. 832-835). IEEE.
- Kumbaroğlu, G., Or, İ., & Işık, M. (2017). Karbon vergisi ile sera gazı emisyonlarının azaltımı: Türkiye vakası. *Uluslararası İlişkiler Dergisi*, 14(54), 149-174.
- Kundu, A., Flores, F., Vázquez, C. A. F., Godoy, H., Quoilin, S., Castaneda, M., & Feijoo, F. (2024). Evaluating the impact of flexibilities from heating and electromobility in Chile's carbon neutrality pathway. *Buildings*, 15(1), 68. <https://doi.org/10.3390/buildings15010068>.
- Kwakwa, P. A. (2021). The carbon dioxide emissions effect of income growth, electricity consumption and electricity power crisis. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 32(3), 470-487. <https://doi.org/10.1108/MEQ-11-2020-0264>.

- Lampropoulos, K. C., Tamvakis, D., Samiotakis, A., & Moropoulou, A. (2022). Re-use of built environment-Strategic planning of sampling locations for the environmental impact assessment of former airports: The use-case of the former Hellenikon airport in Athens, Greece. *Developments in the Built Environment*, 10, 100072. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100072>.
- Lean, H. H., & Smyth, R. (2010). CO₂ emissions, electricity consumption and output in ASEAN. *Applied Energy*, 87(6), 1858-1864. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.003>.
- Lei, W., Xie, Y., Hafeez, M., & Ullah, S. (2022). Assessing the dynamic linkage between energy efficiency, renewable energy consumption, and CO₂ emissions in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-13.
- Li, B., & Haneklaus, N. (2021). The role of renewable energy, fossil fuel consumption, urbanization and economic growth on CO₂ emissions in China. *Energy Reports*, 7, 783-791. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.194>.
- Li, C., Song, D., & Tao, D. (2019, July). Multi-task recurrent neural networks and higher-order Markov random fields for stock price movement prediction: Multi-task RNN and higher-order MRFs for stock price classification. In *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining* (pp. 1141-1151).
- Li, Y., Brando, P. M., Morton, D. C., Lawrence, D. M., Yang, H., & Randerson, J. T. (2022). Deforestation-induced climate change reduces carbon storage in remaining tropical forests. *Nature Communications*, 13(1), 1964. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29601-0>.
- Lim, X. L., & Lam, W. H. (2014). Review on clean development mechanism (CDM) implementation in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 276-285. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.106>.
- Lin, Z., Wang, H., Li, W., & Chen, M. (2023). Impact of green finance on carbon emissions based on a two-stage LMDI decomposition method. *Sustainability*, 15(17), 12808. <https://doi.org/10.3390/su151712808>.
- Liu, X., & Bae, J. (2018). Urbanization and industrialization impact of CO₂ emissions in China. *Journal of Cleaner Production*, 172, 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.156>.
- Llamas-Sánchez, R., Muñoz-Fernández, Á., Maraver-Tarifa, G., & Senés-García, B. (2010). El papel de las ciudades en el desarrollo sostenible: El caso del programa Ciudad 21 en Andalucía (España). *EURE (Santiago)*, 36(109), 63-88.
- Lloyds Bank Trade. (2025a). *Foreign direct investment (FDI) in Israel*. <https://www.lloydsbanktrade.com/en/market-potential/israel/investment>.
- Lloyds Bank. (2025b). *Foreign direct investment (FDI) in South Korea*. Lloyds Bank International Trade Portal. <https://www.lloydsbanktrade.com/en/market-potential/south-korea/investment>.
- Lloyds Bank Trade. (2025c). *Switzerland: Foreign direct investment*. Lloyds Bank Trade. <https://www.lloydsbanktrade.com/en/market-potential/switzerland/investment>.
- Loğoğlu, S. (2017). *Karbon emisyonu ve uluslararası ticaret ilişkisi: Türkiye örneği* [Yüksek lisans tezi]. Çukurova Üniversitesi.

- López, I., Ortega, J., & Pardo, M. (2020). Mobility infrastructures in cities and climate change: An analysis through the superblocks in Barcelona. *Atmosphere*, 11(4), 410. <https://doi.org/10.3390/atmos11040410>.
- Lu, W., Wang, W., Leung, A. Y., Lo, S. M., Yuen, R. K., Xu, Z., & Fan, H. (2002, May). Air pollutant parameter forecasting using support vector machines. In *Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN'02 (Vol. 1, pp. 630-635)*. IEEE.
- Lydia, M., Kumar, S. S., Selvakumar, A. I., & Kumar, G. E. P. (2016). Linear and non-linear autoregressive models for short-term wind speed forecasting. *Energy Conversion and Management*, 112, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.007>.
- Madero, V., & Morris, N. (2016). Public participation mechanisms and sustainable policy-making: A case study analysis of Mexico City's Plan Verde. *Journal of Environmental Planning and Management*, 59(10), 1728-1750. <https://doi.org/10.1080/09640568.2015.1085841>.
- Magazzino, C., Mele, M., & Schneider, N. (2021). A machine learning approach on the relationship among solar and wind energy production, coal consumption, GDP, and CO₂ emissions. *Renewable Energy*, 167, 99-115. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.050>.
- Mahmood, H., Alkhateeb, T. T. Y., Al-Qahtani, M. M. Z., Allam, Z., Ahmad, N., & Furqan, M. (2019). Agriculture development and CO₂ emissions nexus in Saudi Arabia. *PLOS ONE*, 14(12), e0225865. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225865>.
- Mazziotta, M., & Pareto, A. (2022). Normalization methods for spatio-temporal analysis of environmental performance: Revisiting the Min–Max method. *Environmetrics*, 33(5), e2730. DOI: 10.1002/env.2730.
- Menezes, T., Pottier, A., & Roth, C. (2023). The two sides of the Environmental Kuznets Curve: A socio-semantic analysis. *Æconomia. History, Methodology, Philosophy*, 13(2), 279-321. <https://doi.org/10.4000/oeconomia.15729>.
- Meng, X., & Yu, Y. (2023). Can renewable energy portfolio standards and carbon tax policies promote carbon emission reduction in China's power industry? *Energy Policy*, 174, 113461. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113461>.
- Menga, P., Bucciante, R., Bedogni, M., & Moroni, S. (2013, November). Promotion of freight mobility in Milan: Environmental, energy and economical aspects. In *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)* (pp. 1-7). IEEE.
- Mentel, U., Wolanin, E., Eshov, M., & Salahodjaev, R. (2022). Industrialization and CO₂ emissions in Sub-Saharan Africa: The mitigating role of renewable electricity. *Energies*, 15(3), 946. <https://doi.org/10.3390/en15030946>.
- Metcalf, G. E. (2019). On the economics of a carbon tax for the United States. *Brookings Papers on Economic Activity*, 2019(1), 405-484.
- Mike, F., & Kardaşlar, A. (2018). Doğrudan yabancı sermaye yatırımlarının çevre kirliliği üzerine etkisi. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 16(3), 178-191. <https://doi.org/10.11611/yead.377182>.

- Miranda-Barbosa, E., Sigfússon, B., Carlsson, J., & Tzimas, E. (2017). Advantages from combining CCS with geothermal energy. *Energy Procedia*, 114, 6666-6676.
- Mkhonto, C., Mokgehle, S. N., Mbeng, W. O., Ramarumo, L. J., & Ndlhovu, P. T. (2024). Review of *Mimusops zeyheri* Sond. (Milkwood): Distribution, utilisation, ecology and population genetics. *Plants*, 13(20), 2943. <https://doi.org/10.3390/plants13202943>.
- Mohammed, M., Khan, M. B., & Bashier, E. B. M. (2016). *Machine learning: Algorithms and applications*. CRC Press.
- Mol, A. P. J., & Sonnenfeld, D. A. (2000). Ecological modernisation around the world: An introduction. *Environmental Politics*, 9(1), 3-14.
- Mol, A. P., Spaargaren, G., & Sonnenfeld, D. A. (2013). Ecological modernization theory: Taking stock, moving forward. In *Routledge international handbook of social and environmental change* (pp. 15-30). Routledge.
- Monica, S., Natalia, F., & Sudirman, S. (2018, June). Clustering tourism object in Bali province using k-means and x-means clustering algorithm. In *2018 IEEE 20th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 16th International Conference on Smart City; IEEE 4th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)* (pp. 1462-1467). IEEE.
- Moussa, R. R. (2023). Reducing carbon emissions in Egyptian roads through improving the streets quality. *Environment, Development and Sustainability*, 25(5), 4765-4786. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02150-8>.
- Murshed, M., Khan, A. M., Khan, U., Khan, M. S., & Parvin, R. A. (2023). Can utilising renewable and nuclear energy harness the environmental sustainability agenda of the G7 countries? The importance of undergoing clean energy transition. *International Journal of Ambient Energy*, 44(1), 958-972. <https://doi.org/10.1080/01430750.2022.2159872>.
- Musah, M., Kong, Y., Mensah, I. A., Antwi, S. K., & Donkor, M. (2020). The link between carbon emissions, renewable energy consumption, and economic growth: A heterogeneous panel evidence from West Africa. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 28867-28889. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08488-8>.
- Naeem, S., Ali, A., Anam, S., & Ahmed, M. M. (2023). An unsupervised machine learning algorithms: Comprehensive review. *International Journal of Computing and Digital Systems*.
- Narin, M. (2013). Kyoto Protokolü esneklik mekanizması: Emisyon ticareti. In *SESSION 4D: Çevre* (pp. 941-952).
- Nihayah, D. M., Mafruhah, I., Hakim, L., & Suryanto, S. (2022). CO₂ emissions in Indonesia: The role of urbanization and economic activities towards net zero carbon. *Economies*, 10(4), 72. <https://doi.org/10.3390/economies10040072>.
- Nordengen, S., Andersen, L. B., Riiser, A., & Solbraa, A. K. (2021). National trends in cycling in light of the Norwegian bike traffic index. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(12), 6198. <https://doi.org/10.3390/ijerph18126198>.

- O'Mahony, C., & Barry, F. (2005). Making sense of the data on Ireland's inward FDI. *United Nations University, World Institute for Development Economics Research(UNU-WIDER)*.
<https://www.econstor.eu/bitstream/10419/72308/1/521069599.pdf>.
- OECD. (2023). *FDI Qualities Review of Chile: Boosting sustainable development and diversification*. OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/fdi-qualities-review-of-chile_98bf1829-en.html.
- OECD. (2024a). *FDI qualities review of Canada*. OECD Publishing. Erişim tarihi: 16.08.2025,
https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/06/fdi-qualities-review-of-canada_7ab14cc9/273d99ec-en.pdf.
- OECD. (2024b). *OECD economic surveys: Norway 2024*. OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/oecd-economic-surveys-norway-2024_cb13475f-en.html.
- Office for National Statistics (ONS). (2025, January 14). *Foreign direct investment involving UK companies: 2023* [Statistical bulletin]. ONS. <https://shorturl.at/ff8Ts>.
- Olabi, A. G., & Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112111>.
- Orhan, G. (2004). Sürdürülebilir kalkınma, ekolojik modernizasyon ve Türkiye çevre politikası. *Çevre Bilimi & Teknolojisi*, 2(1), 13-28.
- Orta, C. L. (2025). Helsinki's cycling traffic trend in 2018-2024: Overall decline but growth in one cycling highway. *Journal of Cycling and Micromobility Research*, 100075. <https://doi.org/10.1016/j.jcmr.2025.100075>.
- Our World in Data. (2025a). *Share of primary energy consumption from coal*. *Our World in Data*. Erişim tarihi: 14 Ağustos 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/coal-energy-share?tab=table&time=2023>.
- Our World in Data. (2025b). *Share of primary energy consumption from oil*. *Our World in Data*. Erişim tarihi: 14 Ağustos 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/oil-share-energy?tab=table&time=2022..latest>.
- Our World in Data. (2025c). *Share of primary energy consumption from gas*. *Our World in Data*. Erişim Tarihi: 14 Ağustos 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/gas-share-energy?tab=table&time=2023..latest>.
- Our World in Data. (2025d). *Fossil fuel consumption*. *Our World in Data*. Erişim tarihi: 14 Ağustos 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/fossil-fuel-consumption-by-type?tab=table>.
- Our World in Data. (2024a). *Annual CO₂ emissions by 210orld region*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?country=~OWID_WRL.
- Our World in Data. (2024b). *Cumulative CO₂ emissions, 2023*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/cumulative-co-emissions?tab=map>.

- Our World in Data. (2024c). *Per capita CO₂ emissions*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-per-capita?tab=table>.
- Our World in Data. (2024d). *Global fossil fuel consumption*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/global-fossil-fuel-consumption>.
- Our World in Data. (2024e). *Global primary energy consumption by source*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/global-energy-substitution>.
- Our World in Data. (2024f). *Share of primary energy consumption from fossil fuels*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/fossil-fuels-share-energy>.
- Our World in Data. (2024g). *Share of CO₂ emissions embedded in trade*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/share-co2-embedded-in-trade?tab=table&time=earliest..2022>.
- Our World in Data. (2024h). *Foreign direct investment, net inflows as share of GDP, 1970 to 2023*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/foreign-direct-investment-net-inflows-as-share-of-gdp?tab=table>.
- Our World in Data. (2024i). *Share of the population living in urbanized areas, 1500 to 2023*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/long-term-urban-population-region?tab=table&time=1500..latest>
- Our World in Data. (2024j). *Share of primary energy consumption from renewable sources*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/renewable-share-energy?tab=table>.
- Our World in Data. (2024k). *Change in CO₂ emissions and GDP*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/co2-emissions-and-gdp?tab=table>.
- Our World in Data. (2024l). *Share of electricity production from renewables*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-renewables?tab=table>.
- Our World in Data. (2024m). *Modern renewable electricity generation by source*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/modern-renewable-prod?tab=table>.
- Our World in Data. (2024n). *Fossil fuel consumption*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/fossil-fuel-primary-energy?tab=table>.
- Our World in Data. (2024o). *Share of electricity production from fossil fuels*. Erişim tarihi: Mayıs 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-fossil-fuels?tab=table>.
- Our World in Data. (2024p). *Territorial and consumption-based CO₂ emissions*. Our World in Data. Erişim tarihi: 14 Ağustos 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/production-vs-consumption-co2-emissions?tab=table&time=1991..2022&country=~DNK>.
- Our World in Data. (t.y.). *owid/energy-data* [Data set]. Erişim tarihi: Ocak 2025, GitHub. <https://github.com/owid/energy-data>.

- Öbük, D. N., & Sınmaz, S. (2024). İklim değişikliği süreci ve Türkiye’de iklim değişikliği eylem planlarının mekânsal perspektifi. *Kent Akademisi*, 17(3), 939-960. <https://doi.org/10.35674/kent.1451207>.
- Özcan, B. A. (2020). Ortak mülkiyet çerçevesinde iklim değişikliği sorununun çözümünde Kyoto Protokolü’nün etkisi. *Akdeniz İİBF Dergisi*, 20(2), 169-184.
- Özcan, M., & Öztürk, S. (2015). Türkiye’nin elektrik enerjisi üretimi kaynaklı sera gazı emisyonunda beklenen değişimler ve karbon vergisi uygulaması. In *VI. Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi* (pp. 1-5).
- Özdemir, M. S., Dalcalı, A., & Ocak, C. (2020). Akarsu tipi hidroelektrik santraller ve bu santrallerde kullanılan türbin-generatörler. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 2(2), 69-75.
- Özkan, S. (2024). Paris ve Glasgow Anlaşmaları çerçevesinde fosil yakıt alternatifi elektrikli araçların ekonomik ve finansal açıdan irdelenmesi. *Social Mentality and Researcher Thinkers Journal (SMART Journal)*, 7(53), 3300-3311.
- Painter, M., & Durham, W. H. (Eds.). (1995). *The social causes of environmental destruction in Latin America*. University of Michigan Press.
- Panayotou, T. (1997). Demystifying the environmental Kuznets curve: Turning a black box into a policy tool. *Environment and Development Economics*, 2(4), 465-484.
- Pantic, M., & Milijic, S. (2021). The European Green Capital Award-Is it a dream or reality for Belgrade (Serbia)? *Sustainability*, 13, 6182. <https://doi.org/10.3390/su13116182>.
- Papantoniou, A., Danezis, C., & Hadjimitsis, D. G. (2024). Geospatial technology integration in smart city frameworks for achieving climate neutrality by 2050: A case study of Limassol Municipality, Cyprus. *Journal of Geographic Information System*, 16(1).
- Park, Y., & Hauschild, A. C. (2024). The effect of data transformation on low-dimensional integration of single-cell RNA-seq. *BMC Bioinformatics*, 25(1), 171. <https://doi.org/10.1186/s12859-024-05788-5>.
- Pata, U. K., & Yurtkuran, S. (2018). Yenilenebilir enerji tüketimi, nüfus yoğunluğu ve finansal gelişmenin CO₂ salımına etkisi: Türkiye örneği. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 303-318. DOI: 10.18092/ulikidince.441173.
- Pata, U. K., Dam, M. M., & Kaya, F. (2023). How effective are renewable energy, tourism, trade openness, and foreign direct investment on CO₂ emissions? An EKC analysis for ASEAN countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), 14821-14837. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23160-z>.
- Pecinovsky, P. (2022). National recovery and resilience plan: Belgium. *Italian Labour Law e-Journal*, 15(1S). <https://doi.org/10.6092/issn.1561-8048/15670>.
- Pelleg, D., & Moore, A. (2000, June). X-means: Extending k-means with efficient estimation of the number of clusters. In *Proceedings of the 17th International Conference on Machine Learning (ICML '00)* (pp. 727-734). Citeseer.
- Perry, S., Klemeš, J., & Bulatov, I. (2008). Integrating waste and renewable energy to reduce the carbon footprint of locally integrated energy sectors. *Energy*, 33(10), 1489-1497. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.03.008>.

- Polat, O., & Polat, G. E. (2018). Avrupa Birliği ülkelerinde karbondioksit emisyonu ve çevre vergileri: Panel veri analizi yaklaşımı. *Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar*, (639), 1101-1115.
- Polo, A. (2024). *FDI statistics Finland 2023*. Business Finland. Erişim tarihi: 16.08.2025, <https://www.businessfinland.fi/49312a/contentassets/7b10f37bd0654202a8f58d75d55cc302/fdi-statistics-finland-2023.pdf>.
- Prastiyo, S. E., Irham, Hardyastuti, S., & Jamhari, F. (2020). How agriculture, manufacture, and urbanization induced carbon emission? The case of Indonesia. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33), 42092-42103. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10148-w>.
- Prestes, O. M., Ultramari, C., & Caetano, F. D. (2022). Public transport innovation and transfer of BRT ideas: Curitiba, Brazil as a reference model. *Case Studies on Transport Policy*, 10(1), 700-709. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.01.031>.
- Pretis, F. (2022). Does a carbon tax reduce CO₂ emissions? Evidence from British Columbia. *Environmental and Resource Economics*, 83(1), 115-144. <https://doi.org/10.1007/s10640-022-00679-w>.
- Raghutla, C., & Kolati, Y. (2023). Public-private partnerships investment in energy as new determinant of renewable energy: The role of political cooperation in China and India. *Energy Reports*, 10, 3092-3101. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.139>.
- Rahaman, M. A., Hossain, M. A., & Chen, S. (2022). The impact of foreign direct investment, tourism, electricity consumption, and economic development on CO₂ emissions in Bangladesh. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(25), 37344-37358. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18061-6>.
- Rahman, A., Murad, S. W., Mohsin, A. K. M., & Wang, X. (2024). Does renewable energy proactively contribute to mitigating carbon emissions in major fossil fuels consuming countries? *Journal of Cleaner Production*, 452, 142113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142113>.
- Ranhagen, U., & Groth, K. (2012). *The symbiocity approach: A conceptual framework for sustainable urban development*. SKL International.
- RECAI. (2015). *Renewable energy country attractiveness index*. https://energypress.gr/sites/default/files/media/recai_march_2015.pdf.
- Redondo Bermudez, M. D. C., Kanai, J. M., Astbury, J., Fabio, V., & Jorgensen, A. (2022). Green fences for Buenos Aires: Implementing green infrastructure for (more than) air quality. *Sustainability*, 14(7), 4129. <https://doi.org/10.3390/su14074129>.
- Ren, Y. S., Apergis, N., Ma, C., Baltas, K., Jiang, Y., & Liu, J. L. (2021). FDI, economic growth, and carbon emissions of the Chinese steel industry: New evidence from a 3SLS model. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(37), 52547-52564.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2021). *Carbon emissions from deforestation: Are they driven by domestic demand or international trade?* Our World in Data. <https://ourworldindata.org/carbon-deforestation-trade>.

- Rogat, J., Dhar, S., Joshi, R., Mahadevia, D., & Mendoza, J. C. (2015). Sustainable transport: BRT experiences from Mexico and India. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 4(6), 564-574.
- Rowan, S. S. (2025). From gridlock to ratchet: Conditional cooperation on climate change. *International Organization*, 1-24. doi:10.1017/S0020818325000037.
- Sachwald, F. (2002). FDI and the economic status of Korea: The hub strategy in perspective. *Transnational Corporations*, 11(1), 85-95.
- Sadioğlu, U., & Ağıralan, E. (2020). İklim değişikliği çerçevesinde 25. Taraflar Konferansı (COP25). *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11(Ek Sayı-1), 361-385.
- Samuel, A. L. (1959). Some studies in machine learning using the game of checkers. *IBM Journal of Research and Development*, 3(3), 210-229.
- San Cristóbal, J. R. (2011). Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method. *Renewable Energy*, 36(2), 498-502. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.031>.
- Sancar, C., & Polat, M. A. (2018). CO₂ emisyonu-enerji tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki nedensellik ilişkisi: G7 ülkeleri üzerine ekonometrik bir analiz. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, (21), 33-46. DOI: 10.18092/ulikidince.263545.
- Sánchez Cordero, A., Gómez Melgar, S., & Andújar Márquez, J. M. (2019). Green building rating systems and the new framework level (s): A critical review of sustainability certification within Europe. *Energies*, 13(1), 66. <https://doi.org/10.3390/en13010066>.
- Sandoff, A., & Schaad, G. (2009). Does EU ETS lead to emission reductions through trade? The case of the Swedish emissions trading sector participants. *Energy Policy*, 37(10), 3967-3977. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.04.043>.
- Santander Trade. (2025). *Mexico: Foreign trade in figures*. Santander Trade Markets. <https://santandertrade.com/en/portal/analyse-markets/mexico/foreign-trade-in-figures>.
- Sawhney, G. S. (2012). *Non-conventional energy resources*. PHI Learning.
- Schölkopf, B., & Smola, A. J. (2002). *Learning with kernels: Support vector machines, regularization, optimization, and beyond*. MIT Press.
- Schölkopf, B., Williamson, R. C., Smola, A., Shawe-Taylor, J., & Platt, J. (1999). Support vector method for novelty detection. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 12, 582-588.
- Sen, P. C., Hajra, M., & Ghosh, M. (2020). Supervised classification algorithms in machine learning: A survey and review. In *Emerging technology in modelling and graphics: Proceedings of IEM Graph 2018* (pp. 99-111). Springer Singapore.
- Seoul Metropolitan Government. (2004). *Seoul public transportation: Seoul, ready to share with the world!* [PDF]. Metropolis. https://www.metropolis.org/sites/default/files/seoul_public_transportation_english.pdf.

- Shafiei, S., & Salim, R. A. (2014). Non-renewable and renewable energy consumption and CO₂ emissions in OECD countries: A comparative analysis. *Energy Policy*, 66, 547-556. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.064>.
- Shahbaz, M., Loganathan, N., Sbia, R., & Afza, T. (2015). The effect of urbanization, affluence and trade openness on energy consumption: A time series analysis in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 683-693. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.044>.
- Shakya, A. K., Pillai, G., & Chakrabarty, S. (2023). Reinforcement learning algorithms: A brief survey. *Expert Systems with Applications*, 231, 120495. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120495>.
- Shameer, K., Johnson, K. W., Glicksberg, B. S., Dudley, J. T., & Sengupta, P. P. (2018). Machine learning in cardiovascular medicine: Are we there yet? *Heart*, 104(14), 1156-1164.
- Silva, A. M. D. A., Lazaro, L. L. B., Andrade, J. C. S., Prado, A. F. R., Ventura, A. C., Campelo, A., & Tridello, V. (2022). Examining the urban resilience strategy of Salvador, Bahia, Brazil: A comparative assessment of predominant sectors within the resilient cities network. *Journal of Urban Planning and Development*, 148(2), 05022002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000818](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000818).
- Singh, B., & Jana, A. K. (2024). Forecast of agri-residues generation from rice, wheat and oilseed crops in India using machine learning techniques: Exploring strategies for sustainable smart management. *Environmental Research*, 245, 117993. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117993>.
- Singh, R. R., Chelliah, T. R., & Agarwal, P. (2014). Power electronics in hydro electric energy systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 944–959. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.041>.
- Smola, A. J., & Schölkopf, B. (2004). A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing*, 14, 199-222.
- Solangi, K. H., Islam, M. R., Saidur, R., Rahim, N. A., & Fayaz, H. (2011). A review on global solar energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2149–2163. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.007>.
- Songur, D. Y. (2022). Türkiye’de Dış Ticaret Açıklığının CO₂ Emisyonu Üzerine Asimetrik Etkisi: Doğrusal Olmayan ARDL Yaklaşımı. *Dicle Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 12(24), 49-63.
- Soto, G. H., & Edeh, J. (2025). Assessing the foreign direct investment-load capacity factor relationship in Spain: Can FDI contribute to environmental quality? *Environment, Development and Sustainability*, 27(7), 16181-16203. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04680-9>.
- Stamopoulos, D., Dimas, P., Sebos, I., & Tsakanikas, A. (2021). Does investing in renewable energy sources contribute to growth? A preliminary study on Greece’s National Energy and Climate Plan. *Energies*, 14(24), 8537. <https://doi.org/10.3390/en14248537>.
- Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the environmental Kuznets curve. *World Development*, 32(8), 1419-1439.

- Sultana, N., Sharma, N., Sharma, K. P., & Verma, S. (2020). A sequential ensemble model for communicable disease forecasting. *Current Bioinformatics*, 15(4), 309-317. <https://doi.org/10.2174/1574893614666191202153824>.
- Szabó, K., & Gupta, G. S. (2020). Growth of sharing economy in Hungary; Long distance car sharing-A case study of Oszkár. *Review of European Studies*, 12, 9. DOI:10.5539/res.v12n3p9.
- Şahin, G. (2022). Ekolojik Modernleşme Teorisi ve Çevre Politikası Çıkarımları. *Pearson Journal*, 7(21), 236-257.
- Şenol, H., Elibol, E. A., Açikel, Ü., & Şenol, M. (2017). Türkiye’de biyogaz üretimi için başlıca biyokütle kaynakları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 81-92.
- Şimşek, T., & Yiğit, E. (2017). BRİCT ülkelerinde yenilenebilir enerji tüketimi, petrol fiyatları, CO₂ emisyonu, kentleşme ve ekonomik büyüme üzerine nedensellik analizi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 12(3), 117-136.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı. (2024). *Avrupa Yeşil Mutabakatı*. https://www.ab.gov.tr/avrupa-yesil-mutabakati_53729.html.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Başkanlığı. (t.y.). *Paris Anlaşması*. Erişim tarihi: Mart 2025, <https://iklim.gov.tr/paris-anlasmasi-i-34>.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı [MFA]. (t.y.-a). *Temel çevre sorunları*. Erişim tarihi: 25 Mart 2025. https://www.mfa.gov.tr/i_-temel-cevre-sorunlari.tr.mfa.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı [MFA]. (t.y.-b). *Amerika Birleşik Devletleri'nin ekonomisi*. <https://www.mfa.gov.tr/amerika-birlesik-devletleri-ekonomisi.tr.mfa>.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı [MFA]. (t.y.-c). *Avustralya'nın Ekonomisi*. <https://www.mfa.gov.tr/avustralya-ekonomisi.tr.mfa>.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı [MFA]. (t.y.-d). *Kanada'nın Ekonomisi*. <https://www.mfa.gov.tr/kanada-ekonomisi.tr.mfa>.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı [MFA]. (t.y.-e). *Almanya Federal Cumhuriyeti'nin ekonomisi*. <https://www.mfa.gov.tr/sub.tr.mfa?0415756f-ada2-4042-9ae6-d6d576a73496>.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı [MFA]. (t.y.-f). *Belçika'nın Ekonomisi*. <https://www.mfa.gov.tr/belcika-ekonomisi.tr.mfa>.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı [MFA]. (t.y.-g). *Güney Kore'nin Ekonomisi*. https://www.mfa.gov.tr/guney-kore_ekonomisi.tr.mfa.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı [MFA]. (t.y.-h). *Çin Ülke Profili*. <https://www.mfa.gov.tr/kanada-ekonomisi.tr.mfa>.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı [MFA]. (t.y.-ı). *Fransa'nın Ekonomisi*. <https://www.mfa.gov.tr/fransa-ekonomisi.tr.mfa>.
- T.C. Ticaret Bakanlığı. (2024). *İsrail ülke profili 2024* [Rapor]. <https://ticaret.gov.tr/data/5efb250013b876a618413637/İSRAİL%20ülke%20profili%202024.pdf>.

- T.C. Ticaret Bakanlığı. (2025). *Norveç Pazar Bilgileri*. T.C. Ticaret Bakanlığı Uluslararası Anlaşmalar ve Avrupa Birliği Genel Müdürlüğü. <https://ticaret.gov.tr/data/5f3b9e1b13b876ea88e4ca88/Norve%C3%A7%20Pazar%20Bilgileri%20rev1%2018.04.2025.pdf>.
- Tarriño-Ortiz, J., Soria-Lara, J. A., Gómez, J., & Vassallo, J. M. (2021). Public acceptability of low emission zones: The case of “Madrid Central”. *Sustainability*, 13(6), 3251. <https://doi.org/10.3390/su13063251>.
- Taylor, M. S. (2005). Unbundling the pollution haven hypothesis. *Advances in Economic Analysis & Policy*, 4(2).
- TEMA Vakfı. (2022, Mart). *Glasgow İklim Pakti*. https://cdn-tema.mncdn.com/Uploads/Cms/glasgow-iklim-pakti_1.pdf
- TheGlobalEconomy.com. (t.y.). *Turkey: Share of manufacturing in GDP*. Erişim Tarihi:14.06.2025, https://www.theglobaleconomy.com/Turkey/Share_of_manufacturing/.
- Tiikkaja, H., & Viri, R. (2021). The effects of COVID-19 epidemic on public transport ridership and frequencies: A case study from Tampere, Finland. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 10, 100348. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100348>.
- Tilki, F., & Çiçek, E. (2003). Biyokütle enerjisi ve enerji ormancılığı. *Kafkas Üniversitesi Artvin Orman Fakültesi Dergisi*, 1-2, 33-40.
- Tolunay, D. (2015). Türkiye’de ormansızlaşma ile kaybedilen karbon miktarları. In 6. *Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu* (pp. 441-452).
- Trends Research & Advisory. (2024, May 1). *Foreign direct investment in Africa: Trends and prospects*. https://trendsresearch.org/insight/foreign-direct-investment-in-africa-trends-and-prospects/?srsltid=AfmBOooWJeq6VqweuqxOblUYiivHoIJ_T8su3hlB0iEbbH3JiFcR7JRy.
- Tsantekidis, A., Passalis, N., Tefas, A., Kannianen, J., Gabbouj, M., & Iosifidis, A. (2017, August). Using deep learning to detect price change indications in financial markets. In *2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)* (pp. 2511-2515). IEEE.
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33(3), 289-296. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6).
- Turan, A., & Güler, M. (2013). Türkiye’de sürdürülebilir çevre politikaları: İklim değişikliği örneği. In *Sustainable Environmental Policy in Turkey: Climate Change Case*.
- Tutak, M., & Brodny, J. (2022). Renewable energy consumption in economic sectors in the EU-27: The impact on economics, environment and conventional energy sources. A 20-year perspective. *Journal of Cleaner Production*, 345, 131076. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131076>.
- Türkeş, M. (2001). Küresel iklimin korunması, iklim değişikliği çerçeve sözleşmesi ve Türkiye. *Tesisat Mühendisliği, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Süreli Teknik Yayın*, 61, 14-29.

- Türkeş, M., Sümer, U. M., & Çetiner, G. (2000). *Küresel iklim değişikliği ve olası etkileri*. Çevre Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları, 7-24, İstanbul.
- Türkiye Cumhuriyeti Yatırım ve Finans Ofisi. (t.y.). *Türkiye 'de uluslararası doğrudan yatırım*. <https://www.invest.gov.tr/tr/whyturkey/sayfalar/fdi-in-turkey.aspx>.
- Türkoğlu, Ü. Ç. (2021). *Çin 'de CO₂ Emisyonu, Ekonomik Büyüme ve Enerji Tüketimi Arasındaki Nedensellik İlişkisi* [Yüksek Lisans Tezi]. Çankaya Üniversitesi.
- U.S. Department of State. (2024). *2024 Investment climate statements: Denmark*. <https://www.state.gov/reports/2023-investment-climate-statements/kingdom-of-denmark>.
- Uğur, S. (2014). Sera gazı emisyonlarının azaltımında karbon-enerji vergilerinin rolü. *FSM İlmî Araştırmalar İnsan ve Toplum Bilimleri Dergisi*, 3, 341-358. <https://dergi.fsm.edu.tr/index.php/ia/article/view/621>.
- UK Government. (2025). *Greenhouse gas emissions from transport in 2023*. Department for Transport. Erişim tarihi: 16 Ağustos 2025, <https://www.gov.uk/government/statistics/transport-and-environment-statistics-2023--2/greenhouse-gas-emissions-from-transport-in-2023>.
- Ultsch, A., & Lötsch, J. (2022). Euclidean distance-optimized data transformation for cluster analysis in biomedical data (EDOtrans). *BMC Bioinformatics*, 23(1), 233. <https://doi.org/10.1186/s12859-022-04769-w>.
- Uludağ İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği Ar-Ge Şubesi. (2017, Kasım). *Danimarka ülke raporu (Yaş Meyve Sebze Sektörü Açısından)*. Uludağ İhracatçı Birlikleri. <https://uib.org.tr/tr/kbfile/danimarka-ulke-raporu>.
- United States Environmental Protection Agency. (2025). *Transportation sector emissions*. U.S. Environmental Protection Agency. Erişim tarihi: 16 Ağustos 2025, <https://www.epa.gov/ghgemissions/transportation-sector-emissions>.
- Ustaoglu, E. (2022). Yenilenebilir enerji tüketimi ve finansal gelişme ilişkisi: Seçilmiş OECD ülkeleri örneği. *Third Sector Social Economic Review*, 57(1), 280-293. <https://doi.org/10.15659/3.sektor-sosyal-ekonomi.22.02.1718>.
- Van Engelen, J. E., & Hoos, H. H. (2020). A survey on semi-supervised learning. *Machine Learning*, 109(2), 373-440. <https://doi.org/10.1007/s10994-019-05855-6>.
- Vassileva, I., Dahlquist, E., & Campillo, J. (2016). The citizens' role in energy smart city development. *Energy Procedia*, 88, 200-204.
- Vattano, S. (2013). European and Italian experience of Smart Cities: A model for the smart planning of city built. *TECHNE – Journal of Technology for Architecture and Environment*, 110-116.
- Vaz Jr, S., de Souza, A. P. R., & Baeta, B. E. L. (2022). Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100456. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456>.
- Verma, K. K., Singh, B. M., & Dixit, A. (2022). A review of supervised and unsupervised machine learning techniques for suspicious behavior recognition in intelligent surveillance system. *International Journal of Information Technology*, 14(1), 397-410. <https://doi.org/10.1007/s41870-019-00364-0>.

- Villarreal, J. L. S., Avalos, P. G., González, S. R. G., & Mota, F. J. D. (2018, November). Estimate electrical potential of municipal wastewater through a micro-hydroelectric plant. In *2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Voumik, L. C., Islam, M. A., Ray, S., Mohamed Yusop, N. Y., & Ridzuan, A. R. (2023). CO₂ emissions from renewable and non-renewable electricity generation sources in the G7 countries: Static and dynamic panel assessment. *Energies*, *16*(3), 1044. <https://doi.org/10.3390/en16031044>.
- Voyvoda, E. (2025). Çoklu krizler döneminde iklim değişikliği politikalarında yeni yaklaşımlar. *Eğitim Bilim Toplum*, *22*(88), 37-54.
- Waheed, R., Chang, D., Sarwar, S., & Chen, W. (2018). Forest, agriculture, renewable energy, and CO₂ emission. *Journal of Cleaner Production*, *172*, 4231-4238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.287>.
- Wang, C. H., Padmanabhan, P., & Huang, C. H. (2021). The impact of renewable energy, urbanization, and environmental sustainability ratings on the environmental Kuznets curve and the pollution haven hypothesis. *Sustainability*, *13*(24), 13747. <https://doi.org/10.3390/su132413747>.
- Wang, E., Xia, J., Li, J., Sun, X., & Li, H. (2022). Parameters exploration of SOFC for dynamic simulation using adaptive chaotic grey wolf optimization algorithm. *Energy*, *261*, 125146. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125146>.
- Wang, S., & Liu, X. (2017). China's city-level energy-related CO₂ emissions: Spatiotemporal patterns and driving forces. *Applied Energy*, *200*, 204-214. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.085>.
- Wang, S., Zhao, T., Zheng, H., & Hu, J. (2017). The STIRPAT analysis on carbon emission in Chinese cities: An asymmetric Laplace distribution mixture model. *Sustainability*, *9*(12), 2237. <https://doi.org/10.3390/su9122237>.
- Wang, W., Wang, J., & Guo, F. (2018). Carbon dioxide (CO₂) emission reduction potential in east and south coastal China: Scenario analysis based on STIRPAT. *Sustainability*, *10*(6), 1836. <https://doi.org/10.3390/su10061836>.
- Wang, Y., & Zhao, T. (2015). Impacts of energy-related CO₂ emissions: Evidence from under developed, developing and highly developed regions in China. *Ecological Indicators*, *50*, 186-195. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.010>.
- Waskow, D., & Morgan, J. (2015, December 12). *The Paris Agreement: A turning point for a climate solution*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/insights/paris-agreement-turning-point-climate-solution>.
- Watts, D., Albornoz, C., & Watson, A. (2015). Clean Development Mechanism (CDM) after the first commitment period: Assessment of the world's portfolio and the role of Latin America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *41*, 1176-1189. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.146>.

- Webb, R., Dodson, J., Steele, W., Stafford Smith, M., Pradhan, A., & Nairn, K. (2024). *Sustainable cities and regions: 10-year strategy to enable urban systems transformation—2024 update to the 2019 strategy*. Future Earth Australia & Australian Academy of Science. Erişim tarihi: 16 Ağustos 2025, https://www.futureearth.org.au/sites/default/files/2024-05/sustainable-cities-and-regions-update-2024-web_0.pdf.
- Wei, Z., Wei, K., Liu, J., & Zhou, Y. (2023). The relationship between agricultural and animal husbandry economic development and carbon emissions in Henan Province, the analysis of factors affecting carbon emissions, and carbon emissions prediction. *Marine Pollution Bulletin*, 193, 115134. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115134>.
- White & Case. (2025). *Foreign direct investment reviews 2025: Belgium*. White & Case. Erişim tarihi: 16 Ağustos 2025, <https://www.whitecase.com/insight-our-thinking/foreign-direct-investment-reviews-2025-belgium>.
- Wirl, F., Huber, C., & Walker, I. O. (1998). Joint implementation: Strategic reactions and possible remedies. *Environmental and Resource Economics*, 12, 203-224. <https://doi.org/10.1023/A:1008272620797>.
- Witten, I. H., & Frank, E. (2005). *Data mining: Practical machine learning tools and techniques* (2nd ed.). Morgan Kaufmann.
- Witten, I. H., Frank, E., & Hall, M. A. (2011). *Data mining: Practical machine learning tools and techniques* (3rd ed.). Morgan Kaufmann.
- World Population Review. (t.y.-a). *CO₂ emissions by country*. Erişim Tarihi: 5 Temmuz 2025, <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/co2-emissions-by-country>.
- World Population Review. (t.y.-b). *CO₂ emissions by country*. Erişim Tarihi: 5 Temmuz 2025, <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/renewable-energy-by-country>.
- Wu, L., Liu, S., Liu, D., Fang, Z., & Xu, H. (2015). Modelling and forecasting CO₂ emissions in the BRICS (Brazil, Russia, India, China, and South Africa) countries using a novel multi-variable grey model. *Energy*, 79, 489-495. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.052>.
- Wüest Partner. (2024, October 22). *Schweizer Gebäudepark: Der aktuelle Stand im Absenkpfad*. <https://www.wuestpartner.com/ch-de/2024/10/22/schweizer-gebaeudepark-der-aktuelle-stand-im-absenkpfad/>.
- Xu, G., Zhao, T., & Wang, R. (2022). Decomposition and decoupling analysis of factors affecting carbon emissions in China's regional logistics industry. *Sustainability*, 14(10), 6061. <https://doi.org/10.3390/su14106061>.
- Xuchong, Y. A. N. (2025). The impact of foreign direct investment on carbon emissions in China: A provincial panel data analysis. *Theoretical & Applied Economics*, 32(1).
- Yılmaz, M., & Dilber, İ. (2020). Elektrik tüketimi, ekonomik büyüme ve dış ticaret açıklığının CO₂ emisyonu üzerine etkisi: ARDL sınır testi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 459-475. <https://doi.org/10.16953/deusosbil.514374>.

- Yiğit, F., & Canöz, İ. (2022). Sürdürülebilir kalkınma ve yeşil finansman çalışmalarının gelişimi. *Reforma*, 4(92), 37-41.
- York, R., Rosa, E. A., & Dietz, T. (2003). STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 46(3), 351-365. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00188-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00188-5).
- Yu, Z., Khan, S. A. R., Ponce, P., de Sousa Jabbour, A. B. L., & Jabbour, C. J. C. (2022). Factors affecting carbon emissions in emerging economies in the context of a green recovery: Implications for sustainable development goals. *Technological Forecasting and Social Change*, 176, 121417.
- Yue, H., & Bu, L. (2023). Prediction of CO₂ emissions in China by generalized regression neural network optimized with fruit fly optimization algorithm. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(33), 80676-80692. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27888-0>.
- Zangenehmadar, Z., & Moselhi, O. (2016). Assessment of remaining useful life of pipelines using different artificial neural networks models. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(5), 04016032. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000886](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000886).
- Zeng, S., & Wang, M. (2023). Theoretical and empirical analyses on the factors affecting carbon emissions: Case of Zhejiang Province, China. *Environment, Development and Sustainability*, 25(3), 2522-2549. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02148-2>.
- Zeren, F. (2015). Doğrudan yabancı yatırımların CO₂ emisyonuna etkisi: Kirlilik hale hipotezi mi kirlilik cenneti hipotezi mi? *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 10(37), 6442-6448.
- Zhang, C., Cui, C., Zhang, Y., Yuan, J., Luo, Y., & Gang, W. (2019). A review of renewable energy assessment methods in green building and green neighborhood rating systems. *Energy and Buildings*, 195, 68-81. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.040>.
- Zhang, Q., & Habibi, H. (2021). Comparison of data mining methods to predict mechanical properties of concrete with fly ash and alccofine. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 2188-2201. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.024>.
- Zhang, R., & Xue, X. (2021). A predictive model for the bond strength of near-surface-mounted FRP bonded to concrete. *Composite Structures*, 262, 113618. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113618>.
- Zhao, C. Y., Zhang, H. X., Zhang, X. Y., Liu, M. C., Hu, Z. D., & Fan, B. T. (2006). Application of support vector machine (SVM) for prediction toxic activity of different data sets. *Toxicology*, 217(2-3), 105-119. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2005.08.019>.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, ad : ABACI ÖZDEMİR, Hilal

ORCID : 0000-0001-6457-6816

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet
Lisans	Çankırı Karatekin Üniversitesi, İİBF, İşletme	2011
Yüksek Lisans	Çankırı Karatekin Üniversitesi, SBE, İktisat	2014

İş deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014	Çankırı Karatekin Üniversitesi, İİBF, Uluslararası Ticaret ve Finansman Bölümü	Araştırma Görevlisi

Yayınlar

Makaleler:

Abacı, H. (2021). Impacts of EU grant-assisted projects on institutional capacity building and regional development in Turkey: The case of NUTS-2 region TR82. *Ekonomista*, (2), 94-123.

Bayazıt, A., & Özdemir, H. A. (2024). Tüketicilerin yeşil reklamlara yönelik tutumlarının incelenmesi: Çankırı ili örneği. *International Journal of Social and Humanities Sciences Research (JSHSR)*, 11(114), 2724-2742.

Tosunoğlu, N., Abacı, H., Ateş, G., & Saygılı Akkaya, N. (2023). Artificial neural network analysis of the day of the week anomaly in cryptocurrencies. *Financial Innovation*, 9(1), 88.

Uluslararası Kitap Bölümleri:

Abacı Özdemir, H., & Özdemir, B. M. (2024). 2008 küresel finans krizi: Nedenleri, yayılımı ve ekonomik sonuçları. In İ. Cebeci (Ed.), *Finansta ileri araştırmalar* (ss. 55-67). Yaz Yayınları. ISBN 978-625-6171-81-7.

Abacı Özdemir, H., & Özdemir, B. M. (2024). COVID-19 pandemisinin Türkiye ekonomisine etkileri: Finansal piyasalar, üretim, istihdam ve dış ticaret perspektifi. In D. F. Biçer & D. Ö. Akbulut (Eds.), *Teori ve uygulamada sosyal bilimler 1* (ss. 18-30). Duvar Yayınları. ISBN 978-625-6183-86-5.

Abacı, H. (2023). Park ve bahçe süs bitkilerinin uluslararası ticaretinin incelenmesi. In N. Çiçek & C. Yücedağ (Eds.), *Park ve bahçe süs bitkileri* (ss. 5-14). İKSAD. ISBN 978-625-367-418-2.

Bayazıt, A., & Abacı, H. (2022). Tüketicilerin çevre sorumlu tüketim davranışlarının demoğrafik özelliklerine göre değerlendirilmesi. In T. Çetin, H. Kara, & H. Özudoğru (Eds.), *Kuramdan uygulamaya ekonomi ve sosyal bilimlerde akademik araştırmalar* (ss. 73-102). Hiperyayın. ISBN 978-625-8244-63-2.

Benli, Y., & Abacı Özdemir, H. (2025). Kripto paralarda fiyat veya getiri tahmini: Bibliyometrik analiz. In O. Yılmaz (Ed.), *Sosyal, insan ve idari bilimlerde öncü araştırmalar* (ss. 191-210). All Sciences Academy. ISBN 978-625-5900-40-1.

Özdemir, B. M., & Abacı Özdemir, H. (2024). Süs bitkilerinde tüketicilerin satın alma davranışını etkileyen faktörler. In N. Çiçek & C. Yücedağ (Eds.), *Bitki materyali ve yetiştiriciliğinde aktüel çalışmalar* (ss. 3-15). İKSAD Yayınevi. ISBN 978-625-378-017-3.

Özdemir, B. M., & Abacı Özdemir, H. (2024). Süs bitkilerinde tüketicilerin satın alma davranışını etkileyen faktörler. In N. Çiçek & C. Yücedağ (Eds.), *Bitki materyali ve yetiştiriciliğinde aktüel çalışmalar* (ss. 3-15). İKSAD Yayınevi. ISBN 978-625-378-017-3.

Özdemir, B. M., & Abacı Özdemir, H. (2024). Tıbbi ve aromatik bitkilerin uluslararası ticaretinin incelenmesi. In N. Çiçek & C. Yücedağ (Eds.), *Tıbbi ve aromatik bitkilere bir keşif yolculuğu* (ss. 3-19). İKSAD Yayınevi. ISBN 978-625-378-005-0.

Uluslararası Bildiriler:

Abacı Özdemir, H., Karacan, G., Akça, H., & Şahin, L. (2019, September 9). Türkiye’de uygulanan AB hibe destekli projelerin incelenmesi (2000-2015). *Proceedings of the International Conference on Eurasian Economies 2015*.

Karacan, G., Abacı Özdemir, H., Akça, H., & Şahin, L. (2015, September 9-11). Kalkınma ajansları aracılığıyla dağıtılan hibelerin PESTLE yöntemi ile analizi: Türkiye’de KUZKA örneği. *Proceedings of the International Conference on Eurasian Economies 2015*.

