

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

**EKONOMİ, ALTYAPI VE İNOVASYON KAPSAMINDA AB ÜLKELERİNİN  
ULAŞTIRMA ETKİNLİĞİNİN ANALİZİ**

**Doktora Tezi**

**Nergiz YANLIÇ**

**Ankara, 2025**

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

**EKONOMİ, ALTYAPI VE İNOVASYON KAPSAMINDA AB ÜLKELERİNİN  
ULAŞTIRMA ETKİNLİĞİNİN ANALİZİ**

**Doktora Tezi**

**Nergiz YANLIÇ**

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

**Ankara, 2025**

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

**EKONOMİ, ALTYAPI VE İNOVASYON KAPSAMINDA AB ÜLKELERİNİN  
ULAŞTIRMA ETKİNLİĞİNİN ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Tez Danışmanı**

**Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ**

**TEZ JÜRİSİ ÜYELERİ**

**Adı ve Soyadı**

- 1- Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ
- 2- Prof. Dr. Kadir GÜRDAL
- 3- Prof. Dr. Güray KÜÇÜKKOÇAOĞLU
- 4- Prof. Dr. Ayşe YILDIZ
- 5- Doç. Dr. Mustafa DOĞAN

**Tez Savunması Tarihi:**

**17.06.2025**

**TÜRKİYE CUMHURİYETİ**  
**ANKARA ÜNİVERSİTESİ**  
**Sosyal Bilimler Enstitüsü Müdürlüğü'ne,**

**Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ** danışmanlığında hazırladığım “**EKONOMİ, ALTYAPI VE İNOVASYON KAPSAMINDA AB ÜLKELERİNİN ULAŞTIRMA ETKİNLİĞİNİN ANALİZİ**” (Ankara, 2025) adlı doktora tezimdeki bütün bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak toplanıp sunulduğunu, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

**15.08.2025**

**Nergiz YANLIÇ**

## İÇİNDEKİLER

|                        |     |
|------------------------|-----|
| İÇİNDEKİLER.....       | i   |
| TABLolar LİSTESİ ..... | iii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ ..... | v   |
| KISALTMALAR.....       | vi  |
| GİRİŞ.....             | 1   |

## BİRİNCİ BÖLÜM

### KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Çevre.....                                                           | 9  |
| 1.1.1. Çevre ve Ekonomi .....                                             | 11 |
| 1.1.2. Çevre ve Altyapı .....                                             | 13 |
| 1.1.3. Çevre ve İnovasyon .....                                           | 14 |
| 1.1.4. AB'nin Taraf ya da Üye Olduğu Anlaşma, Birlik ve Komisyonlar ..... | 16 |
| 1.2. Literatür Araştırması.....                                           | 18 |

## İKİNCİ BÖLÜM

### ETKİNLİK VE ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Etkinlik ve Verimlilik.....                        | 31 |
| 2.2. Veri Zarflama Analizi.....                         | 33 |
| 2.2.1. CCR Modeli.....                                  | 34 |
| 2.2.2. BCC Modeli.....                                  | 35 |
| 2.3. İstenmeyen Çıktılar İle Veri Zarflama Analizi..... | 35 |
| 2.4. Veri Zarflama Analizi ve Çevresel Etkinlik .....   | 37 |

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### AMPİRİK ÇALIŞMA VE BULGULAR

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 3.1. Yöntem .....                               | 39 |
| 3.2. Karar Verme Birimleri ve Değişkenler ..... | 40 |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1. Karar Verme Birimlerinin Belirlenmesi .....        | 40 |
| 3.2.2. Değişkenlerin Belirlenmesi .....                   | 41 |
| 3.3. Araştırma Modelleri .....                            | 43 |
| 3.3.1. Ekonomi Bağlamında Çevre Etkinliği-Model 1 .....   | 43 |
| 3.3.2. Altyapı Bağlamında Çevre Etkinliği-Model 2.....    | 44 |
| 3.3.3. İnovasyon Bağlamında Çevre Etkinliği-Model 3 ..... | 45 |
| 3.4. Analiz ve Bulgular.....                              | 46 |
| 3.4.1. Analiz ve Bulgular_ Model 1 .....                  | 47 |
| 3.4.2. Analiz ve Bulgular_ Model 2 .....                  | 52 |
| 3.4.3. Analiz ve Bulgular_ Model 3 .....                  | 58 |
| 3.4.4. Modellerin Karşılaştırılması .....                 | 63 |

## **DÖRDÜNCÜ BÖLÜM**

### **SONUÇ VE DEĞERLENDİRME**

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| <b>SONUÇ VE DEĞERLENDİRME .....</b> | <b>69</b> |
| <b>KAYNAKÇA.....</b>                | <b>74</b> |
| <b>ÖZET .....</b>                   | <b>89</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>               | <b>91</b> |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tablo 1. Yolcu Taşıma Türleri.....</b>                                                     | <b>1</b>  |
| <b>Tablo 2. Yük Taşıma Türleri.....</b>                                                       | <b>2</b>  |
| <b>Tablo 3. Rekabetçi ve kaynak verimli bir ulaşım sistemi için hedefler.....</b>             | <b>4</b>  |
| <b>Tablo 4. Karar Verme Birimleri ve Gelişmişlik Sıralamaları.....</b>                        | <b>40</b> |
| <b>Tablo 5. Değişken Bilgileri.....</b>                                                       | <b>41</b> |
| <b>Tablo 6. Model 1 değişken yapısı .....</b>                                                 | <b>43</b> |
| <b>Tablo 7. Tanımlayıcı İstatistikler (Model 1_Grup 1). ....</b>                              | <b>44</b> |
| <b>Tablo 8. Tanımlayıcı İstatistikler (Model 1_Grup 2) .....</b>                              | <b>44</b> |
| <b>Tablo 9. Model 2 değişken yapısı .....</b>                                                 | <b>44</b> |
| <b>Tablo 10. Tanımlayıcı İstatistikler (Model 2_Grup 1). ....</b>                             | <b>45</b> |
| <b>Tablo 11. Tanımlayıcı İstatistikler (Model 2_Grup 2) .....</b>                             | <b>45</b> |
| <b>Tablo 12. Model 3 değişken yapısı .....</b>                                                | <b>46</b> |
| <b>Tablo 13. Tanımlayıcı İstatistikler (Model 3_Grup 1) .....</b>                             | <b>46</b> |
| <b>Tablo 14. Tanımlayıcı İstatistikler (Model 3_Grup 2) .....</b>                             | <b>46</b> |
| <b>Tablo 15. Gelişmiş AB Ülkeleri İçin İyileştirme Önerileri (Model 1_Grup 1) .....</b>       | <b>51</b> |
| <b>Tablo 16. Gelişmekte Olan AB Ülkeleri İçin İyileştirme Önerileri (Model 1_Grup 2).....</b> | <b>51</b> |
| <b>Tablo 17. Gelişmiş AB Ülkeleri İçin İyileştirme Önerileri (Model 2_Grup 1) .....</b>       | <b>56</b> |
| <b>Tablo 18. Gelişmekte Olan AB Ülkeleri İçin İyileştirme Önerileri (Model 2_Grup 2).....</b> | <b>57</b> |
| <b>Tablo 19. Gelişmiş AB Ülkeleri İçin İdeal Değişken Değerleri (Model 3_Grup 1) .....</b>    | <b>62</b> |

|                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tablo 20. Gelişmekte Olan AB Ülkeleri İdeal Değişken Değerleri (Model 3_Grup 2).....</b>               | <b>62</b> |
| <b>Tablo 21. Gelişmiş AB Ülkelerinin (Grup 1) 2023 Yılı İçin Hesaplanan Etkinlik Skorları.....</b>        | <b>64</b> |
| <b>Tablo 22. Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin (Grup 2) 2023 Yılı İçin Hesaplanan Etkinlik Skorları.....</b> | <b>65</b> |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. EU-27'de İklim Hedeflerine Ulaşma Yönündeki İlerleme .....                                                                  | 6  |
| Şekil 2. Avrupa'da Ulaştırmadan Kaynaklı Sera Gazı Emisyonları .....                                                                 | 7  |
| Şekil 3. 2000–2024 Döneminde Bölgesel Düzeyde Toplam ve Kişi Başına Karbon Dioksit (CO <sub>2</sub> ) Emisyonları .....              | 9  |
| Şekil 4. 2022–2024 Döneminde Bölgesel Düzeyde CO <sub>2</sub> Emisyonları .....                                                      | 10 |
| Şekil 5. 2017–2024 Dönemi AB ve Küresel Rakipleri İnovasyon Performansı Değişimi .....                                               | 15 |
| Şekil 6. Gelişmiş AB Ülkelerinin (Grup 1) 2023 Yılı İçin Hesaplanan Ekonomi Temelli Model Çevresel Etkinlik Skorları .....           | 47 |
| Şekil 7. Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin (Grup 2) 2023 Yılı İçin Hesaplanan Ekonomi Temelli Model Çevresel Etkinlik Skorları.....     | 48 |
| Şekil 8. Gelişmiş AB Ülkelerinin (Grup 1) 2023 Yılı İçin Hesaplanan Altyapı Temelli Model Çevresel Etkinlik Skorları .....           | 53 |
| Şekil 9. Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin (Grup 2) 2023 Yılı İçin Hesaplanan Altyapı Temelli Model Çevresel Etkinlik Skorları.....     | 54 |
| Şekil 10. Gelişmiş AB Ülkelerinin (Grup 1) 2023 Yılı İçin Hesaplanan İnovasyon Temelli Model Çevresel Etkinlik Skorları .....        | 58 |
| Şekil 11. Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin (Grup 2) 2023 Yılı İçin Hesaplanan İnovasyon Temelli Model Çevresel Etkinlik Skorları ..... | 59 |

## KISALTMALAR

|                       |                                                                                                |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AB</b>             | Avrupa Birliği                                                                                 |
| <b>Ar-Ge</b>          | Araştırma ve Geliştirme                                                                        |
| <b>BM</b>             | Birleşmiş Milletler                                                                            |
| <b>BMİDÇS</b>         | Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi                                       |
| <b>CERN</b>           | European Organization for Nuclear Research (Avrupa Nükleer Araştırma Örgütü)                   |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | Karbondiyoksit                                                                                 |
| <b>COP</b>            | Conference of the Parties (Taraflar Konferansı)                                                |
| <b>EEA</b>            | European Environment Agency (Avrupa Çevre Ajansı)                                              |
| <b>EI</b>             | Eco-innovation                                                                                 |
| <b>ICAO</b>           | International Civil Aviation Organisation (Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü)                |
| <b>IMO</b>            | International Maritime Organization (Uluslararası Denizcilik Örgütü)                           |
| <b>UNEP</b>           | United Nations Environment Programme (BM Çevre Programı)                                       |
| <b>ERA</b>            | European Research Area (Avrupa Araştırma Alanı)                                                |
| <b>EU</b>             | European Union (Avrupa Birliği)                                                                |
| <b>EUREKA</b>         | European Research Coordination Agency                                                          |
| <b>GHG</b>            | Greenhouse Gas (Sera Gazı)                                                                     |
| <b>GSYİH</b>          | Gayri Safi Yurtiçi Hasıla                                                                      |
| <b>I</b>              | Girdi (Input)                                                                                  |
| <b>IEA</b>            | International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)                                       |
| <b>IPCC</b>           | Uluslararası İklim Değişikliği Paneli                                                          |
| <b>JRC</b>            | Joint Research Centre (AB Ortak Araştırma Merkezi)                                             |
| <b>O</b>              | Çıktı (Output)                                                                                 |
| <b>OECD</b>           | Organisation for Economic Co-Operation and Development (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü) |

|               |                                                                           |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <b>SDGR</b>   | The Sustainable Development Goals Report                                  |
| <b>UN</b>     | United Nations (Birleşmiş Milletler)                                      |
| <b>UNEP</b>   | United Nations Environment Programme (Birleşmiş Milletler Çevre Programı) |
| <b>UNFCCC</b> | United Nations Framework Convention On Climate Change                     |
| <b>VZA</b>    | Veri Zarflama Analizi                                                     |
| <b>WEF</b>    | World Economic Forum                                                      |

## GİRİŞ

Avrupa Çevre Ajansı'na göre; ulaştırma, insanları, kültürleri, şehirleri, ülkeleri ve kıtaları birbirine bağlar. Modern toplumların ve ekonomilerin temel yapı taşlarından biri olarak, üreticilerin ürünlerini dünya çapında satmalarına ve bireylerin yeni yerler keşfetmelerine imkân tanır. Ulaştırma ağları, eğitim ve sağlık gibi temel kamu hizmetlerine erişimi de mümkün kılarak yaşam kalitesinin artmasına katkıda bulunur. Ulaştırmaya erişim, özellikle uzak bölgelerde ekonomik büyümeyi teşvik eder, istihdam yaratır ve refahın yayılmasını sağlar.

Taşımacılık sektörü genel olarak yolcu taşımacılığı ve yük taşımacılığı şeklinde ikiye ayrılmıştır (Song ve diğerleri, 2015). Avrupa ulaştırma istatistikleri, çeşitli ulaşım türlerine göre alt başlıklarda analiz edilmektedir. Bazı ulaştırma türleri hem yolcu hem de yük taşımacılığı için ortak iken, Tablo 1' de görüldüğü gibi boru hatları gibi bazı türler yalnızca belirli bir taşımacılık biçimine özgüdür (Eurostat, 2025).

**Tablo 1.** Yolcu Taşıma Türleri

| Ana Kategori       | Alt Kategori              | Detaylar                          |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Kara Taşımacılığı  | Yol Taşımacılığı          | Binek Otomobiller                 |
|                    |                           | Motosiklet ve Motorlu Bisikletler |
|                    |                           | Otobüsler ve Yolcu Otobüsleri     |
|                    | Demiryolu Taşımacılığı    | Yüksek Hızlı Trenler              |
|                    |                           | Geleneksel Demiryolları           |
| Deniz Taşımacılığı | Denizyolu Taşımacılığı    | Denizyolu ile Yolcu Taşımacılığı  |
| Hava Taşımacılığı  | Uçakla Yolcu Taşımacılığı |                                   |

**Kaynak:** (Eurostat, 2025).

Ulaştırma sektöründe yolcu taşımacılığı modları; karayolu, demiryolu ve havayolu olmak üzere üç ana başlık altında toplanmıştır.

**Tablo 2.** Yük Taşıma Türleri

| Ana Kategori       | Alt Kategori               | Detaylar                             |
|--------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Kara Taşımacılığı  | Yol Taşımacılığı           |                                      |
|                    | Demiryolu Taşımacılığı     |                                      |
|                    | Boru Hattı Taşımacılığı    | Sıvı ve Gaz Taşımacılığı             |
| Deniz Taşımacılığı | Denizyolu Taşımacılığı     |                                      |
|                    | İç Su Yolları Taşımacılığı | Nehir, Kanal ve Gllerle Taşımacılık |
| Hava Taşımacılığı  |                            |                                      |

**Kaynak:** (Eurostat, 2025).

Ulaşım, malların ve insanların hareketini gerçekleştirirken ve aynı zamanda çevrenin korunmasına katkıda bulunmalıdır. Ancak mevcut ulaştırma modeli bazı olumsuz sonuçlar da doğurmaktadır. Ulaştırma sektörü evre ve insan sağlığı üzerinde ciddi düzeyde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Avrupa Birliği'nde ulaştırma, toplam sera gazı (GHG) emisyonlarının yaklaşık dörtte birinden sorumludur; ayrıca hava kirliliği, gürültü kirliliği ve habitat parçalanmasına neden olmaktadır. Ulaştırma sektörü, sürdürülebilir bir ekonomik çerçevenin ilerlemesinde önemli bir rol oynar. Ulaştırma alanında; talep yönetimi, operasyon yönetimi, fiyatlandırma politikaları, araç teknolojisindeki gelişmeler, temiz yakıtların kullanımı ve arazi kullanımının ulaştırma planlamasıyla bütünleştirilmesi gibi stratejiler sürdürülebilirliği artırmak için kritik öneme sahiptir. Diğer taraftan, sürdürülebilir bir kalkınmanın varlığından söz edebilmek için; düşük emisyonlu ve ucuz enerjiyle çalışan bir ulaşım sistemi gereklidir. Bu sistemin aynı zamanda verimli ve güvenli olması gerekmektedir. Bununla birlikte; bu alanda yapılan araştırmalarda, ekonomik alanda büyüme ile ulaşım sektörü karşılıklı bir ilişki olduğu belirtilmektedir (Deakin,2001; Rokicki ve diğerleri,2021; EEA).

Birleşmiş Milletlerin Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'nın; 7 inci ana başlığında "Erişilebilir ve Temiz Enerji" yer alırken, 11 inci ana hedef olarak belirlenen

“Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar” başlığı altında “Erişilebilir ve Sürdürülebilir Ulaşım Sistemleri” bulunmaktadır (UN SDGR, 2024).

Birleşmiş Milletler Taraflar Konferansı'nın (COP28) 28. oturumu, 30 Kasım - 13 Aralık 2023 tarihleri arasında Dubai'de gerçekleşmiş olup, fosil yakıtlara bağımlılıktan kurtulma konusunda dünya çapında bir fikir birliğinin sağlandığı önemli bir dönüm noktasını temsil etmektedir.

Son yıllarda sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma kavramlarına yönelik ilgi belirgin şekilde artış göstermektedir. Kent nüfuslarındaki hızlı artış, mevcut altyapının eskimesi ve çevresel sorunların derinleşmesi, politika yapıcılar üzerinde ciddi baskılar oluşturmakta ve çözüm üretme gerekliliğini gündeme getirmektedir. Bu koşullar altında, insan ve yük taşımacılığına yönelik güvenli, hızlı ve çevresel açıdan sürdürülebilir hareketliliği sağlayacak altyapı ve hizmetlerin sunulması her geçen gün daha karmaşık bir hâl almaktadır. Ulaştırma sistemlerinin kalitesinin ve sürdürülebilirliğinin artırılmasına yönelik yatırımlar ise, kentlerin üretkenliğini, yaşanabilirliğini ve çekiciliğini güçlendirme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, ulaştırma sektörü sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından merkezi bir konumda yer almaktadır (Gruetzmacher ve diğerleri, 2020).

Enerji tüketiminde, %90'nın üzerinde olan payıyla, karayolu taşımacılığı en önemli faktördür. Kişi başına ulaşımda enerji kullanımı ile kişi başına GSYİH arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır. Ulaşımda enerji tüketiminin azaltılması, yenilikçi enerji tasarrufu teknolojilerine bağlıdır (Rokicki ve diğerleri, 2021).

Çevre ile ilgili politikalar ve teknolojik yenilikler, CO<sub>2</sub> emisyonların azaltılmasında önemli faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Ulaşım ile ilgili iklim değişikliğini azaltma teknolojilerindeki %1'lik bir artışın CO<sub>2</sub>'yi %0,11 ile %0,18 arasında azalttığı söylenmektedir (Georgatzi, 2020).

Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan Beyaz Kitap'ta (White Paper, 2011); ulaşımın küresel ekonomik entegrasyondaki rolüne dikkat çekilmiştir. Gelecekteki refahın dünya ekonomisine tam ve rekabetçi bir şekilde entegre olma yeteneğine bağlı olduğu ve etkin ulaşım sistemlerinin bu entegrasyonun sağlanmasında hayati bir rol oynadığı vurgulanmıştır. Aynı zamanda Beyaz Kitap'ta Avrupa Birliği üyesi ülkeleri için; %60 sera gazı emisyonunu azaltma amacına ulaşmak için hedefler belirlenmiştir. Bu hedeflerin bazıları ve hedef yılları Tablo 3'te sunulmuştur.

**Tablo 3.** Rekabetçi ve kaynak verimli bir ulaşım sistemi için hedefler

| Politika Hedefi                                                                                                                                                                              | Hedef Yılı |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Şehirlerde geleneksel yakıtlı araçları tamamen kullanımdan kaldırmak                                                                                                                         | 2050       |
| Havacılıkta düşük karbonlu sürdürülebilir yakıtların kullanımını %40'a ulaştırmak; denizcilik yakıtlarından kaynaklanan CO <sub>2</sub> emisyonlarını %40 (mümkünse %50) azaltmak            | 2050       |
| Karayolu yük taşımacılığının %30'unu raylı sistem ya da denizyoluna kaydırmak                                                                                                                | 2030       |
| Avrupa yüksek hızlı demiryolu ağını tamamlamak ve orta mesafeli yolcu taşımacılığının çoğunluğunu demiryolu ile gerçekleştirmek                                                              | 2050       |
| Akıllı bilgi sistemleriyle ulaştırma altyapısının modernizasyonunu sağlamak                                                                                                                  |            |
| Karayolu taşımacılığında ölümleri sıfıra yaklaştırmak ("Vision Zero")                                                                                                                        | 2050       |
| "Kullanan öder" ve "kirleten öder" ilkelerinin tam uygulanmasına yönelmek ve özel sektör katılımını teşvik ederek gelir elde etmek ve gelecekteki ulaşım yatırımları için finansman sağlamak |            |

**Kaynak:** White Paper (2011) Verilerine dayanarak yazar tarafından hazırlanmıştır.

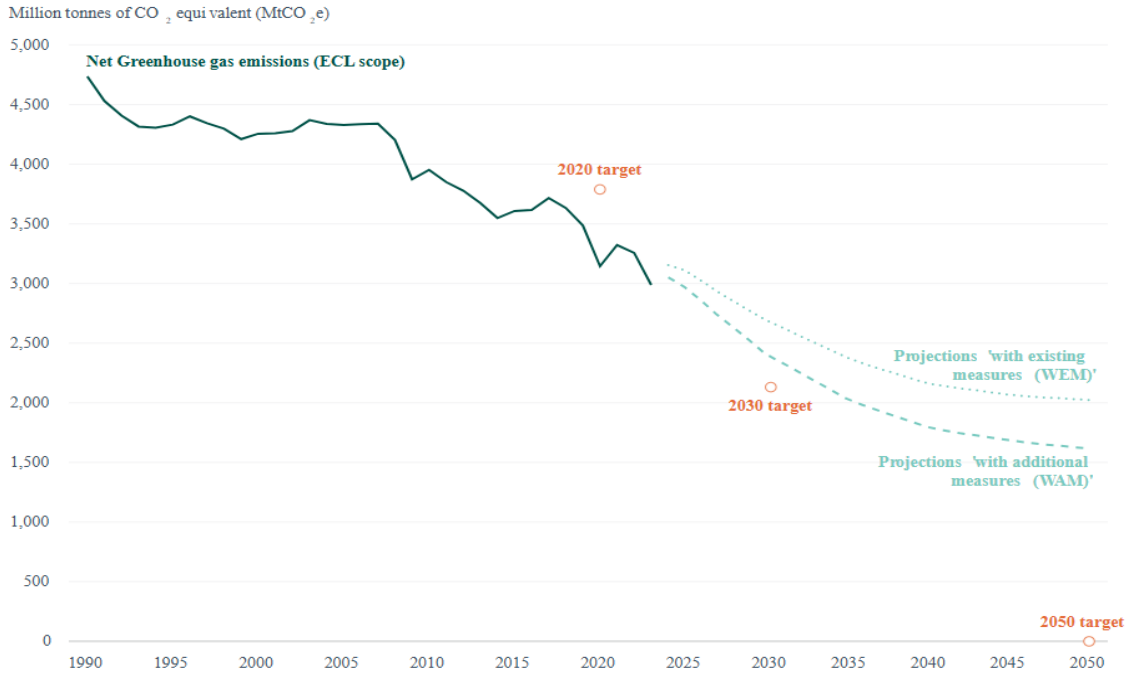
Ulaşım sektöründe köklü bir dönüşüm, yeterli bir altyapı ağı ve bu ağın akıllıca kullanımı olmadan mümkün değildir. Ulaşım altyapısına yapılan yatırımlar, ekonomik büyümeye olumlu katkılar sağlayarak refah ve istihdam yaratmakta, ticareti güçlendirmekte, coğrafi erişilebilirliği artırmakta ve bireylerin hareketliliğini kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte, ulaşım altyapısının planlanması, ekonomik büyümeyi en üst düzeye çıkarırken çevresel etkileri en aza indirecek şekilde gerçekleştirilmelidir. Bu bağlamda, sürdürülebilir ve akıllı altyapı sistemlerinin

geliştirilmesi hem ekonomik hem de çevresel hedeflerin dengelenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir (European Commisison, 2011).

Ulaştırma, ekonomik büyümeye ve yaşam kalitesinin artmasına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır; ancak beraberinde getirdiği dışsallıklar çevresel, ekonomik ve sosyal etkiler doğurmakta, bu da sürdürülebilir ulaşırmaya yönelik inovasyonun desteklenmesinde temel itici güç olmaktadır. Avrupa Komisyonu'nun Avrupa Yeşil Mutabakatı'na ilişkin bildirimi, 2050 yılına kadar iklim nötrlüğüne ulaşma hedefini ortaya koymakta olup, bu hedef doğrultusunda ulaştırma kaynaklı emisyonların daha da azaltılması gerekmektedir (Tsakalidis ve diğerleri, 2020).

Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonları, yenilikçilik, finansal gelişim, ulaşım altyapısı ve ekonomik büyüme gibi çok sayıda faktörden etkilenmektedir. Bu faktörler, çevresel sürdürülebilirlik üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Yenilikçilik, düşük karbonlu teknolojilerin geliştirilmesini teşvik ederken, finansal gelişim bu teknolojilere yatırım yapılmasını sağlamakta; ulaşım altyapısı ve ekonomik büyüme ise emisyonların hacmini ve yoğunluğunu belirlemektedir. Bu bağlamda, çevresel sürdürülebilirliği artırmak için ulaşım sektöründeki CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması, bu faktörlerin bütüncül bir şekilde ele alınmasını gerektirmektedir (Umar ve diğerleri, 2020).



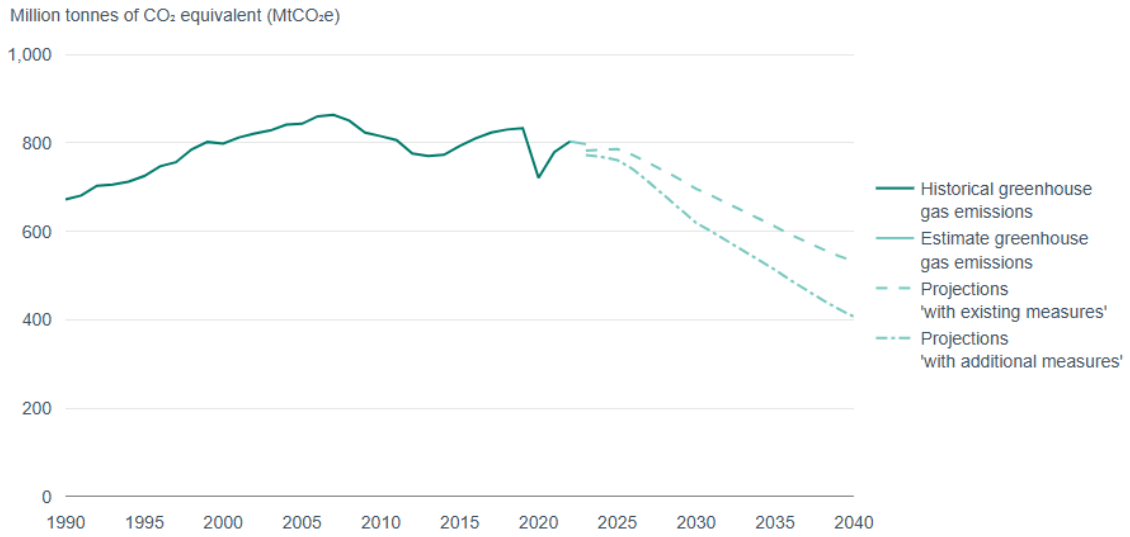


Kaynak: Avrupa Çevre ajansı (EEA),

<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/total-greenhouse-gas-emission-trends>

### Şekil 1. EU-27'de iklim hedeflerine ulaşma yönündeki ilerleme

Ulaştırma, güçlü ve dinamik bir ekonomi ile toplumun temel dayanaklarından biri olup, aynı zamanda üretim ve hareketlilik açısından vazgeçilmez bir araçtır. Mal ve insan taşımacılığı yoluyla işletmeleri birbirine bağlayan farklı ulaşım türleri arasında kara yolu taşımacılığı, sunduğu yüksek erişilebilirlik avantajı nedeniyle özel bir öneme sahiptir. Avrupa Birliği bağlamında değerlendirildiğinde, kara yolu taşımacılığı sektörü yalnızca taşımacılık işleviyle değil, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma hedeflerine olan bağlılığıyla da stratejik bir rol üstlenmektedir. Bu yönüyle, kara yolu taşımacılığı hem sektör içinde hem de diğer sektörlerde istihdam yaratarak Avrupa ekonomisinin refahını koruma ve geliştirme açısından kritik bir sanayi kolu olarak değerlendirilmektedir (Mansouri Kaleibar ve Kırmacı, 2024).



Kaynak: Avrupa Çevre ajansı (EEA),

<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/total-greenhouse-gas-emission-trends>

## Şekil 2. Avrupa’da Ulaştırmadan Kaynaklı Sera Gazı Emisyonları

Avrupa ulaştırma sisteminin dönüşümü, yalnızca tüm düzeylerde gerçekleştirilecek çok yönlü girişimlerin birleşimiyle mümkün olacaktır (European Commission, 2011). Araştırma ve Geliştirmeyi daha üretken hale getirmek için öncelikle Ar-Ge'nin üretkenliğini değerlendirmek esastır. Bu konudaki daha önceki araştırma çalışmalarının çoğu, Ar-Ge üretkenliğini firma veya endüstri düzeyinde yakalamayı amaçlamıştır (Lee ve Park, 2005). Aynı şekilde çevre, ekonomi ve altyapı kapsamında yapılan çalışmalar incelendiğinde daha çok Çin Halk Cumhuriyeti ya da kısıtlı sayıdaki ülkeler ile ilgili ve genellikle enerji etkinliğine odaklı analizlerin yapıldığı dikkat çekmektedir. Ayrıca her geçen gün ülkelerin çevre ile ilgili farkındalıkları ve politikaları değişmektedir. Ulaştırma alanında da kısıtlı çalışma olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile; gerek çevre, ekonomi, altyapı ve inovasyon etkinliği çerçevesinde analiz edilen ülkelerin ve dönemin çeşitliliği, gerek güncel politika ve uygulamaların değerlendirilmesi bağlamında önemli katkılar sağlanacağı beklenmektedir.

Çalışmanın birinci bölümünde ulaştırma sektörü kapsamında çevrenin ekonomi, altyapı ve inovasyon boyutları ile ilgili detaylı bilgiye ve kapsamlı literatür incelemesine

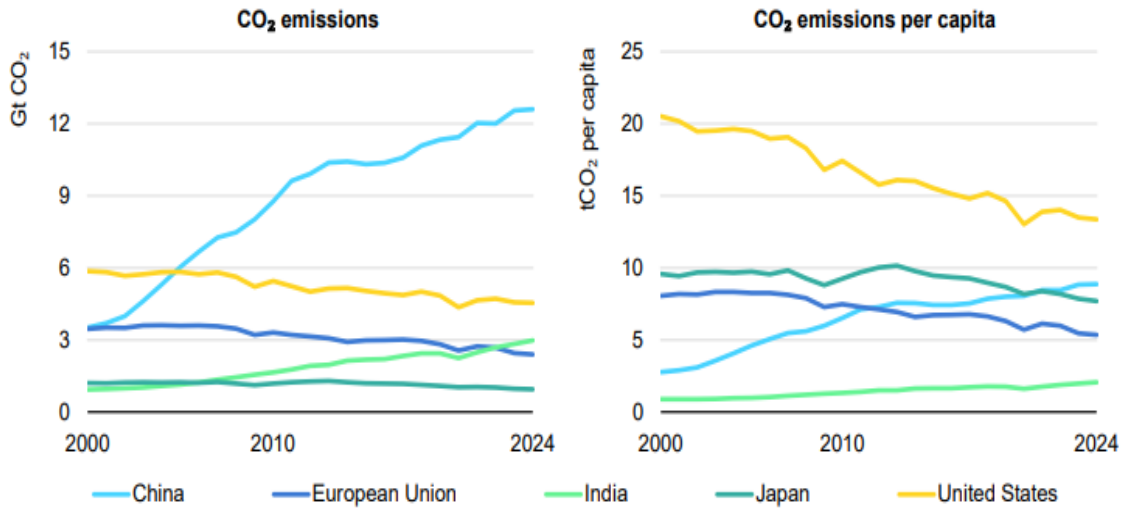
yer verilmiştir. İkinci bölümde; etkinlik kavramı ile birlikte araştırma yöntemleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, çalışma kapsamında yer alan modeller, değişkenler ve karar verme birimleri hakkında bilgi verilerek analiz sonuçları yer almaktadır. Dördüncü bölümde analiz sonucu elde edilen bulgulara yönelik değerlendirilme ve öneriler sunulmuştur.

## BİRİNCİ BÖLÜM

### KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

#### 1.1. Çevre

Çok sayıda çevresel krizin kümülatif sonuçları, gezegensel ekosistemlerin temel yapıları için önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Mevcut ampirik verilere göre, 2023 yılı küresel olarak en sıcak yıl olarak belgelenmiştir. Daha önce hiç olmadığı kadar küresel sıcaklıklar Paris Anlaşması'nın 1,5°C'nin altındaki sınırlarına tehlikeli bir şekilde yaklaşmış durumdadır. Birleşmiş Milletlerin 2024 yılı Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri Raporuna göre; küresel düzeyde, atmosferik karbondioksit konsantrasyonları ve sera gazı emisyonları 2022 yılında çok yüksek düzeylere gelmiştir. Ne yazık ki bu seviye 2023 yılında herhangi bir düşüş gösterme eğiliminde olmamıştır (BM SDGR, 2024).



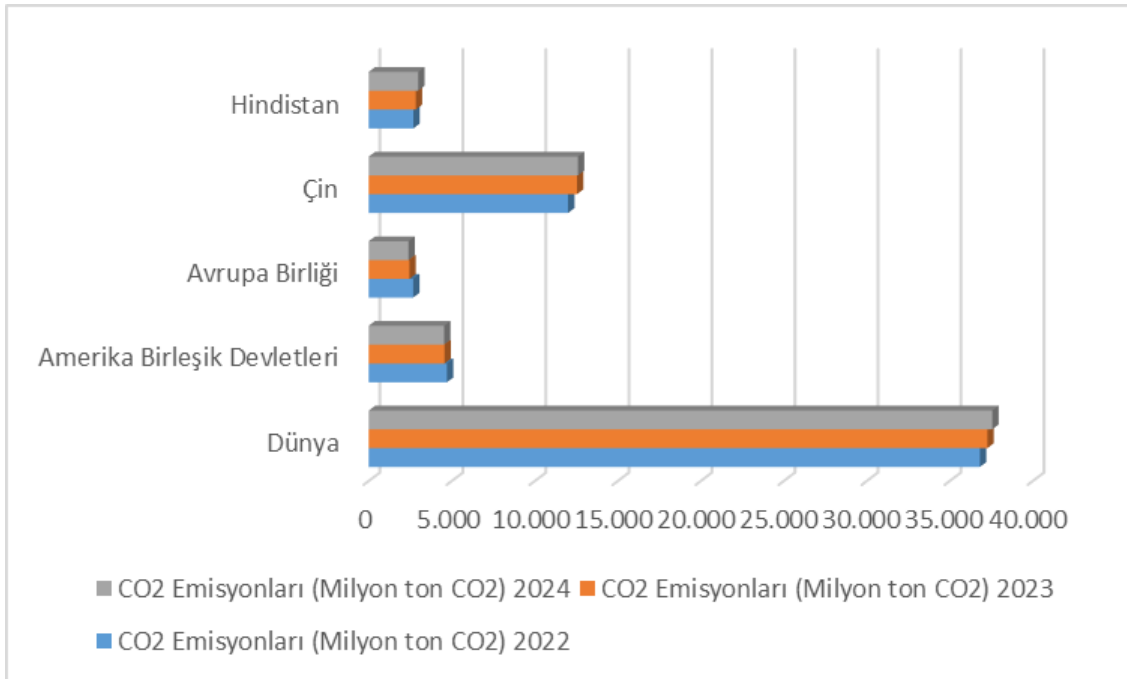
**Kaynak:** (Global Energy Review, 2025).

**Şekil 3.** 2000–2024 Döneminde Bölgesel Düzeyde Toplam ve Kişi Başına Karbon Dioksit (CO<sub>2</sub>) Emisyonları

“İklim değişikliği”, 1994 yılında imza altına alınan, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) uyarınca, benzer zamansal çerçeveler içinde belirgin olan doğal iklim değişikliklerinin yanı sıra, doğrudan veya dolaylı olarak Dünya

atmosferinin bileşimini bozan antropojenik faaliyetlerden kaynaklanan iklim değişiklikleri olarak tanımlanmaktadır (UNFCCC, 1992). İklim değişkenliği ise, Ay, mevsim ya da yıl gibi kısa süreli zaman dilimlerinde meydana gelen değişimlerdir. BMİDÇS’de iklim değişikliğinin doğal süreçlerin yanı sıra, insan faktörlü olarak da gerçekleştiğine dikkat çekilmiştir.

Büyük miktardaki zehirli gaz ve partikül kirliliği, fosil yakıtlar (petrol, kömür ve doğal gaz) ve arazilerin kullanımını değiştirmekte ve bunun sonucunda atmosferdeki sera gazlarının miktarlarında önemli artışlar olmaktadır. Sera gazı salınımında meydana gelen bu artışlar, sera etkisinin genişlemesine neden olmaktadır. Bununla birlikte de küresel çapta iklim küresel ısınma sorunu meydana getirmiştir (Kadioğlu, 2007). IPCC'ye göre de, iklim değişikliğindeki CO<sub>2</sub> seviyelerindeki artışın temel kaynağı fosil yakıtlardır.



**Kaynak:** (Global Energy Review, 2025).

**Şekil 4.** 2022–2024 Döneminde Bölgesel Düzeyde CO<sub>2</sub> Emisyonları.

Son yıllarda, Avrupa Birliği’nde ulaşım faaliyetleri istikrarlı bir şekilde artmış ve gayrisafi yurtiçi hasıladaki (GSYİH) büyümeyle güçlü bir bağlantı göstermiştir. Çoğu üretim süreci gibi, ulaşım faaliyetleri de kaçınılmaz olarak karbondioksit (CO<sub>2</sub>)

emisyonları gibi çevresel açıdan zararlı yan ürünlerin oluşumuna yol açmaktadır. Bu durum, ulaşım sektörünün ekonomik büyümeye katkısının yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerinin de dikkate alınmasını gerektirmektedir (Krautzberger ve Wetzel, 2012).

### **1.1.1. Çevre ve Ekonomi**

Ekonomik büyüme sürecinde, enerjiye olan bağımlılığın artacağı ve buna paralel olarak enerji talebinin yükseleceği öngörülmektedir. Ancak, enerji kullanımının çevreye zararlı etkilere yol açabileceği unutulmamalıdır. Çevrenin bozulması ekonomik kalkınmayı kısıtlayacak ve dolayısıyla enerji kullanımını etkileyecektir. Bu nedenle sürdürülebilir ekonomik kalkınma için, ülkelerin enerjiyi etkin bir şekilde kullanması ile çevre konusunda hassasiyet göstermesi olmazsa olmaz unsurlardır. Bu unsurların birbirleriyle olan ilişkilerine bakıldığında ise enerji verimliliğini etkileyen ana etkenler çevre ile ilgili durumlar ve ekonomik kalkınmadır. Diğer taraftan, çevre ve ekonomik kalkınma da enerji verimliliğinden etkilenmektedir. Bütün bu bilgiler birlikte değerlendirildiğinde, çevre, ekonomik gelişme ile enerjinin birbirlerini etkilediği sonucuna ulaşılmaktadır (Fathi ve diğerleri, 2021). Son yıllarda, veri zarflama analizi modellerini kullanarak enerji, ekonomik ve çevresel verimliliğin değerlendirilmesi akademik olarak gündemde olan bir konu olmuştur (Wang ve diğerleri, 2016). Enerji verimliliğinin gerçek performansı, sürdürülebilir kalkınmanın tüm yönlerini dikkate alacak şekilde değerlendirilmelidir. Burada önemli husus, çevre, ekonomik gelişme ve enerji ile ilgili durumların birlikte nasıl ele alınacağıdır. Ekonomik gelişme ile doğal kaynakların kullanımı ve çevre koruma arasındaki ilişki oldukça karmaşıktır ve hayati önem taşır. Bu dengeyi sağlamak için hem ekonominin büyümesine odaklanmalı hem de doğal kaynakları sürdürülebilir bir şekilde kullanmalı ve çevreye karşı duyarlılık gösterilmelidir. Bu durum enerji kullanımı ile ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi ve

Çevresel etkinin birlikte değerlendirilmesini gerektirir (Vaninsky, 2018; Fathi ve diğerleri, 2021).

Bir ekonominin büyümesi için uygun maliyetli enerjinin bulunabilirliği ve erişilebilirliği çok önemlidir (Jain ve Goswami, 2021). Enerji verimliliği, karbondan arındırılmış ekonomik büyümeyi sağlamak ve ekolojik değişimi hafifletmek için önemli bir emisyon azaltma aracıdır (Akram ve diğerleri, 2021). Ekonomik büyüme ile enerji kullanımı ve çevresel sorunlar arasında çok açık bir ilişki vardır. Büyüme için daha fazla enerji, enerji kullanımı sonucunda da daha fazla salınım kaçınılmazdır. Bu tür birçok gösterge, politika oluşturma sürecinde ekonomileri değerlendirmek için faydalı olabilir. Entegre performansı ölçmek için bu göstergelerden nasıl yararlanılacağını bilmek kritik önem taşımaktadır. Son yıllarda, birincil odak noktasının sera gazı emisyonlarının azaltılması olacağı bir çevresel tehlike yönetimi programını sahnelemek üzere dünya düzeyinde zirveler düzenlenmiştir. Bu zirvelerin sonuçlarının tarihsel olarak incelenmesi, ortak sorumluluklar ilkesine dayalı olarak, gelişmekte olan ülkeler herhangi bir taahhütte bulunmasalar da bu sözleşmelerin hedeflerine ulaşma konusunda net bir duruşa sahip olduklarını göstermektedir. evre kirliliğini en aza indirmenin giderek daha fazla önem kazanması nedeniyle, daha yüksek seviyelerde sera gazı salımı gerçekleştiren ekonomiler, sera gazlarının zararlı etkilerini yönetmede zorluklarla karşılaşmaktadır. Bununla birlikte; çevreyi kamusal bir mal olarak düşünmek, enerji kullanımını ve ilişkili emisyonları azaltmak da bir ekonomi için hayati öneme sahip olma durumuna gelmektedir. Bahsi geçen hedeflere erişmenin yolu; sürdürülebilir bir gelişimin her bir unsurunun hem ülke içinde hem de lkelerarası etkileşime girmesi ve aynı zamanda iş birliği yapılmasından geçmektedir (Fathi ve diğerleri, 2021). Ulaşım sektöründe en çevreci demiryoludur.

Özetle; ulaşım, ekonomi ve toplumun temel taşlarından birini oluşturmaktadır. Mobilite, i pazarın işleyişi için kritik bir öneme sahip olup, bireylerin seyahat

özgürlüğünü kullanabilmeleri yoluyla yaşam kalitesini artırmaktadır. Ulaşım sektörü, ekonomik büyümeyi desteklemekte ve istihdam yaratımına katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, karşı karşıya olduğumuz yeni zorluklar ışığında, ulaşım sistemlerinin sürdürülebilir olması gerekliliği ön plandadır. Ulaşımın küresel niteliği, etkili politikaların ve çözümlerin uluslararası iş birliğini gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, sürdürülebilir ve etkin ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi hem ekonomik hem de toplumsal hedeflerin gerçekleştirilmesi için vazgeçilmezdir (European Commisison, 2011).

### **1.1.2. Çevre ve Altyapı**

Verimli ulaşım altyapısı ve hizmetleri, bölgelerin küresel pazarlara erişimini kolaylaştırarak ekonomik rekabet gücünü artırır ve sürdürülebilir kalkınmayı destekler. Bu nedenle, ulaşım sektörünün optimizasyonu, kıtasal ve küresel ekonomik hedeflerin gerçekleştirilmesi için kritik bir öneme sahiptir (European Commisison, 2011).

Ulaştırma altyapısına yapılan harcamalar, yalnızca miktar açısından değil, stratejik ve etkin kullanım açısından da değerlendirilmelidir. Özellikle ulaştırma yatırımlarının çıktılar üzerindeki etkisinin daha dikkatli izlenmesi, kaynakların optimum biçimde kullanılmasını sağlayacaktır (Zhao ve diğerleri, 2015).

Ulaşım altyapısının ekonomik kalkınmadaki önemli rolü yadsınamaz; ancak, bu altyapı aynı zamanda küresel ısınmaya önemli bir katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için ulaşım sektörüne yapılan yatırımların düşük karbonlu ulaşım seçeneklerine dönüştürülmesi zorunludur. Bu dönüşüm, çevresel etkileri en aza indirirken ekonomik büyümeyi destekleyen bir ulaşım sisteminin geliştirilmesini gerektirmektedir (Liu ve diğerleri, 2022).



### 1.1.3. Çevre ve İnovasyon

‘İnovasyon’ (yenilik) kelimesinin kökeni Latince ‘innovare’ sözcüğüne dayanmaktadır ve bu kavram bir şeyi yaratma yeteneği olarak tanımlanabilir. Yenilik teorisini ilk olarak bir ekonomist olan Schumpeter, 1912 yılında yayımladığı Ekonomik Kalkınma Teorisi (The Theory of Economic Development) adlı eserinde ortaya koymuştur. İnovasyon etkinliği (innovation efficiency) kavramını ise, 1960’lı yıllarda Schmookler ortaya atmıştır. İnovasyon etkinliği, yeniliğe yönelik yapılan yatırımların ürünlere ve kâra dönüştürülme yeteneği olarak tanımlanabilir. Bu kavram, bir işletmenin hedeflerine ulaşma derecesini ya da çıktılarla ekonomik ve sosyal çevre arasındaki etkileşimi ölçmektedir (Zeng ve diğerleri, 2022).

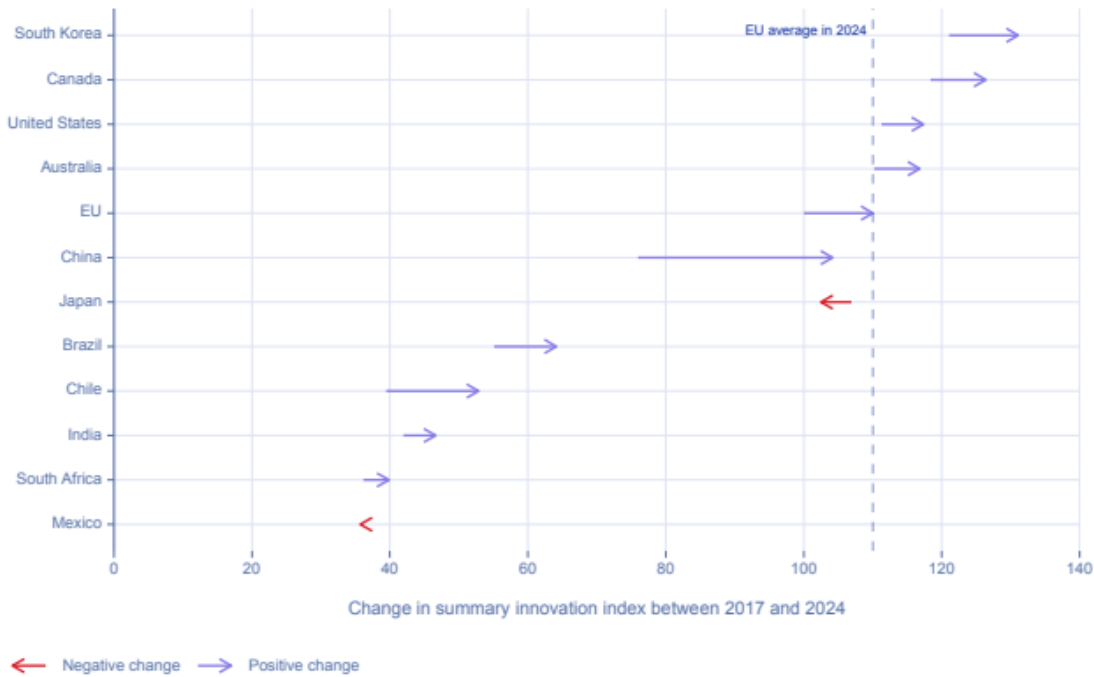
Yenilikler, çevre performansını artırmak amacıyla ürün, süreç ve organizasyonel ilkelerde inovasyonu vurgulayan girişimleri ifade eder. Eko-inovasyon girdileri, çıktıları, süreçleri, kaynak verimliliğini ve sosyoekonomik sonuçları içeren karmaşık bir fikir olmaları nedeniyle, büyük ölçekli veri analizinin dinamiklerinin daha net bir şekilde anlaşılmasına yardımcı olur (Mavi ve Mavi, 2021). Taşımacılıkta enerji emilimini azaltmak ve hava kirliliğini azaltmak için yeniliklere-inovasyona ihtiyaç vardır (Rokicki ve diğerleri, 2021).

Taşımacılık sektöründeki yeniliklerin emisyonları ve refah maliyetlerini azalttığı ve yenilenebilir teknolojilerin karbon nötralitesinin sağlanmasında çok önemli bir rol oynadığı ileri sürülmektedir (Khurshid ve diğerleri, 2023). Ekonomik büyüme ile eko-verimlilik arasındaki bağlantı olumlu ancak zayıftır ve bu durum eko-inovasyonun ekonomik politikalara daha fazla dahil edilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir (Domagala & Kadłubek, 2022).

Eko-yenilikçi teknolojiler CO<sub>2</sub> azaltımlarına önemli ölçüde katkıda bulunmuştur ve yeni araç kayıtları önemli miktarda CO<sub>2</sub> emisyonundan tasarruf sağlar (Gil-Sayas ve diğerleri, 2022). Bununla birlikte, farklı teknolojiler arasındaki etkileşimler, genel

etkinliklerini azaltabilir ve bu da dikkatli uygulama stratejilerine ihtiyaç olduğunu gösterir (Gil-Sayas ve diğerleri, 2022).

Bazı ülkeler eko-inovasyonda başarılı olsa da diğerlerinin etkili stratejiler benimsemekte zorlandığı ve bu da bu boşlukları kapatmak için belirli politikalara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Ortak sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için AB genelinde eko-inovasyon projelerini koordine etmek devam eden bir zorluk olmaya devam etmektedir. Son yirmi yılda Avrupa Birliği'ne üye ülkelerin çoğu, yenilikçilik ve ekonomik gelişme alanlarında önemli araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) stratejileri ve politikalarını hayata geçirmiştir. Asıl soru, bu politikaların işe yarayıp yaramadığıdır. Asgari bir araştırma eşiğine ulaşma ihtiyacı, teknolojik yayılmaların yayılmasında önemli mesafe bozulması etkilerinin varlığı, Ar-Ge yatırımlarında ölçeğe göre artan getirilerin varlığı veya bu bölgelerde yenilik üretmek için gerekli sosyo-ekonomik koşulların mevcut olmaması gibi argümanlar, bu tür politikaların olası getirileri hakkında şüphe uyandırıyor gibi görünmektedir (Bilbao-Osorio ve Rodriguez-Pose, 2004).



**Kaynak:** European Commission (2024). [https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/statistics/performance-indicators/european-innovation-scoreboard\\_en](https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/statistics/performance-indicators/european-innovation-scoreboard_en)  
**Şekil 5.** 2017–2024 Dönemi AB ve Küresel Rakipleri İnovasyon Performansı Değişimi

Ulaşım sektöründe araçlar ve trafik yönetimi için geliştirilen yeni teknolojiler, Avrupa Birliği (AB) ve dünya genelinde ulaşım kaynaklı emisyonların azaltılmasında kilit bir rol oynamaktadır. Sürdürülebilir mobiliteye yönelik küresel rekabet, ulaşım sektörünün teknolojik yenilikleri benimseme hızını kritik hale getirmiştir. Yeni teknolojilerin uygulanmasında gecikme veya çekingen yaklaşımlar, AB ulaşım endüstrisinin geri dönüşü olmayan bir gerileme riskiyle karşı karşıya kalmasına yol açabilir. Hızla gelişen küresel ulaşım pazarlarında, AB ulaşım sektörü giderek artan bir rekabetle karşı karşıyadır. Bu bağlamda, inovasyonların etkin ve zamanında uygulanması hem çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak hem de AB'nin küresel pazarlardaki rekabet gücünü korumak için vazgeçilmezdir (European Commisison, 2011).

#### **1.1.4. AB'nin Taraf ya da Üye Olduğu Anlaşma, Birlik ve Komisyonlar**

Avrupa Birliği, çevre ve inovasyon alanlarında birçok konuda öncülük yapmıştır. Gerek küresel gerek bölgesel bazda birçok anlaşma ve protokole taraf olmuş; birçok organizasyon, program ve yapılara üye olmuştur. Aynı zamanda bu alanlarda iş birlikleri gerçekleştirmiştir.

AB'nin çevre duyarlılığı uzun yıllara dayanmaktadır. 1970 yılında OECD Çevre Komitesinde Avrupa Birliği'ne üye ülkelerin bazıları yer almıştır. 1972 yılında, Birleşmiş Milletler Çevre Programında (UNEP) yer alarak, çevre kirliliğini önlemek amacıyla geliştirilen politikaların küresel çapta uygulanması hususunda öncülük etmiştir.

Avrupa Birliği, Montreal Protokolü (1987) ile ozon tabakasını incelten faktörlerin kullanımına ve üretimine yönelik önlemlere katılmıştır.

BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC, 1994) kapsamında; iklim değişikliği ile mücadele için küresel çapta ilk çerçeve anlaşmada yerini almıştır. Bu yıl 29 uncusu Bakü'de düzenlenen BMİDÇS Taraflar Konferanslarına (COP) katılmış ve belirlenen hedeflerde öncülük yapmıştır. COP29 zirvesinde; 2019 yılında bölgesel çapta düzenlenen Avrupa Yeşil Mutabakatı ile belirlenen 2050 yılına kadar net sıfıra ulaşma

hedefini yineleyerek, sera gazı emisyonlarında oldukça kararlı olduğunu gösterdi. Söz konusu zirvede; Amerika Birleşik Devletleri 2005 yılına oranla, 2030 yılına kadar emisyonları %50-52 bandında azaltmayı taahhüt ederken, Çin ise karbon nötr taahhüdünü 2060 yılında gerçekleşmiş olacağını açıkladı.

BMİDÇS Taraflar Konferanslarından biri olan COP3 sonucunda 1997 yılında Kyoto Protokolüne taraf olarak, iklim değişikliğinde insan faktörünü önlemek için sera gazı emisyonlarını azaltma konusunda önemli kararların alınmasında rol oynamışlardır. 2015 yılında düzenlenen COP21 Paris İklim Anlaşması olarak da anılan Paris Anlaşması ile; küresel sıcaklık artışlarını 1,5 oC ile sınırlamayı kabul etmişlerdir.

Avrupa Birliği, çevre konusunda aşağıda sayılan bölgesel düzeyde sözleşmeler düzenlemiştir:

- Bern Sözleşmesi(1886)
- Barselona Sözleşmesi(1978)
- Espoo Sözleşmesi(1997)
- Aarhus Sözleşmesi(2001)

Avrupa Birliği ülkeleri inovasyon alanında da uzun yıllardır Avrupa Nükleer Araştırma Örgütü (CERN,1954) gibi yapılar kurarak bölgesel ve küresel düzeyde birçok katkıda bulunmuştur. EUREKA ve Avrupa Ufuk Programı gibi mekanizmalarla Ar-Ge ve inovasyon faaliyetlerine finansman desteği sunmaktadır.

Aynı zamanda; OECD'nin teknoloji ve inovasyona yönelik politika ve stratejiler geliştirme konusunda rehberlik ettiği OECD İnovasyon Stratejisine, Avrupa Birliği destek vermektedir.

Sürdürülebilir bir ulaşım sisteminin sağlanması amacıyla yine bölgesel ve küresel düzeyde birçok yapıda aktif rol almıştır. Bu kapsamda, bir Birleşmiş Milletler kuruluşu olan Uluslararası Denizcilik Örgütünde (IMO) yer almaktadır. Karbon nötr olma hedefini

havacılık sektöründe uygulamayı hedefleyen Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) faaliyetlerine AB de destek vermektedir.

Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında düzenlenen Fit for 55 Package ile, elektrikli araçlara ait alt yapıların iyileştirilmesi gibi amaçlar geliştirilerek, ulaşım sektöründe emisyonları azaltma yönünde önemli düzenlemeler yapmıştır. Temiz Ulaşım Girişimi ile Avrupa Birliği ulaşım sektöründe (kara, deniz ve hava taşımacılığında) çevre dostu teknolojilere geçiş için destek vermektedir.

AB yukarıda sayılanlarla birlikte aşağıda sırlanan birçok yapının kurulması, desteklenmesi ve uygulanmasında aktif rol almıştır:

- Trans-European Transport Network (TEN-T)
- Shift2Rail (Demiryolu Taşımacılığı için İnovasyon Ortaklığı)
- Uluslararası Ulaştırma Forumu (ITF)
- Denizlerin Gemiler Tarafından Kirlenmesinin Önlenmesine Dair Uluslararası Sözleşme (MARPOL)
- Avrupa Deniz Emniyeti Ajansı (EMSA)
- Baltık Deniz Çevre Koruma Komisyonu (HELCOM)
- CIVITAS Girişimi
- Yakıt Hücreleri ve Hidrojen Ortak Girişimi

## **1.2. Literatür Araştırması**

Çevre etkinliğini firma, şehir, bölge ve ülke bazında araştıran birçok araştırma olmasına rağmen ekonomi, altyapı ve inovasyon perspektifinde yapılan araştırmalar sınırlı sayıda kalmıştır. Çalışma kapsamında; ulaşım sektörü alanında gerçekleştirilen etkinlik analizlerini içeren literatür ile birlikte Avrupa Birliği ülkeleri bağlamında yapılan etkinlik analizlerini içeren literatür de kapsamlı biçimde incelenmiş ve aşağıda özet bilgileri sunulmuştur.

Lam ve Shui (2001), Çin Halk Cumhuriyetindeki 30 bölgenin 1995-1996 yılları için VZA yöntemi ile termal enerji üretimi etkinliği analiz etmişlerdir. Analiz sırasında; girdi olarak iş gücü, toplam yakıt tüketimi ve üretim kapasitesi kullanılmıştır. Bölgelerin elektrik üretim miktarı da çıktı olarak ele alınmıştır. Çalışmada ayrıca Tobit Regresyon yöntemi uygulanmış ve yakıt tüketimi ve kapasite değişkenlerinin enerji üretimi etkinliği üzerinde etkisi olduğu saptanmıştır.

Pacudan ve Guzman (2002), Filipinler'deki 15 elektrik dağıtım kuruluşunun teknik verimliliğini incelemişlerdir. Veri zarflama analizi (girdi yönlü CCR ve BCC) metodolojisini kullanarak gerçekleştirdikleri incelemede, dağıtım hizmetlerinde teknik verimsizliğin ana kaynağının ölçek verimsizliği olduğunu tespit etmişlerdir.

Bilbao-Osorio ve Rodriguez-Pose (2004), iki aşamalı analiz kullanmışlardır. İlk aşamada; sektörler bazında Ar-Ge yatırımlarının yenilik üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İkinci aşamada ekonomik gelişme ile yenilik gelişimi arasındaki ilişki ele alınmaktadır. Sonuçlar, yükseköğretim sektörüne ait Ar-Ge yatırımları ile inovasyon arasında aynı yönlü bir ilişkili olduğunu göstermektedir.

Lee ve Park (2005), Asya ülkelerinin Ar-Ge verimliliğini ölçmek için veri zarflama analizi (VZA) yaklaşımını kullanmışlardır. Singapur'un genel üretkenlikte iyi bir performans sergilediği, Japonya'nın ise patentlere dayalı üretkenlikte öne çıktığı tespit edilmiştir.

Ramanathan (2005), 1992-1996 dönemi için 17 ülkenin, VZA yöntemi ile enerji tüketimi ile karbondioksit emisyonlarını analiz etmiş, ayrıca Malmquist Verimlilik Endeksi (MPI) ile de söz konusu ülkelerin verimliliğindeki değişiklikleri incelemiştir. Çalışma sonucunda 1996 yılı için; ölçeğe göre sabit getiri varsayımı ile Sudan, Bahreyn ve Umman etkin, diğer taraftan değişken getiri varsayımı ile Moritanya ve İsrail etkin olarak bulunmuştur. Aynı zamanda 1992-1996 yılları karşılaştırıldığında; Sudan, Umman, Mısır, Cezayir ve Suriye'nin gelişme gösterdiği saptanmıştır.

Chien ve Hu (2007), 45 ülkenin yenilenebilir enerjinin teknik performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada 2001-2002 yıllarına ait veriler kullanılarak VZA yöntemi ile analiz yapılmıştır. Analizde sermaye stoğu, emek ve enerji tüketimi kullanılırken; Gayri Safi Yurt içi Hasıla (GSYİH) çıktı olarak kullanılmıştır. Araştırma, OECD ekonomilerinin yenilenebilir kaynaklar içerisinde diğer ülkelere kıyasla daha büyük bir teknik verimlilik ve daha büyük bir jeotermal, güneş, gelgit ve rüzgar enerjisi oranı sergilediğini göstermiştir; bununla birlikte OECD dışında kalan ekonomilerin, genel enerji tedariklerinde daha yüksek yenilenebilir enerji yüzdesine sahip olduğu belirtilmiştir. Danimarka, İrlanda, Japonya, Birleşik Krallık ve Lüksemburg verimli ülkeler olarak belirlenmiştir.

Ceylan ve Gunay (2010), karşılaştırma ve kıyaslama yoluyla Türkiye'nin bakış açısını anlamak amacıyla VZA (Girdi yönlü CCR) yöntemini kullanarak 32 Avrupa ülkesinin ekonomi çapında enerji verimliliği performansını hesaplamışlardır. Çalışma 1995-2007 dönemini kapsamaktadır. Analizde; gayri safi sermaye oluşumu, Ar-Ge harcamaları, enerji tüketimi ve emek girdi; GSYİH (istenen) ve sera gazı emisyonu (istenmeyen) çıktı olarak kullanılmış ve özellikle 2002'den sonra tüm ülkelerde enerji verimliliğinde bir iyileşme olduğu görülmüştür. Ancak çevresel verimlilik ölçümünün tüm ülkelerde çok daha düşük sonuçlar verdiği çalışmanın bulguları arasında yer almıştır. Türkiye, dikkate alınan ülkeler arasında enerji verimliliği en yüksek ülkeler arasında karşımıza çıkmaktadır ve en yüksek artışın 2004 yılı sonrasında gerçekleştiği belirtilmiştir. Bu durumun enerji fiyatlarının fazla olduğu, ekonomik büyüme ve enerji verimliliğine ilişkin düzenlemelerin olduğu bir periyoda denk geldiği vurgulanmıştır.

Fancello ve diğerleri (2014), CRS (sabit getiri) ve VRS (değişken getiri) modelleri kapsamında VZA yöntemi ile İtalya'nın 8 şehri için karayolu sistem performans analizi yapmışlardır. Çalışmada kullanılan değişkenler:

Girdi değişkenleri:

- Kayıtlı araç sayısı / kentsel yol ağı uzunluğu
- Belediye binasına 300 m mesafedeki çekim merkezleri
- Belediye harcamaları / yol ağı uzunluğu
- Toplu taşıma araç sayısı / yol ağı uzunluğu

Çıktı değişkenleri:

- Hizmet Seviyesi
- Belediye binasına ulaşım süresi / erişim sayısı (1/ortalama süre alınmıştır)
- Ölümcül kaza sayısı / yol ağı uzunluğu (1/değer alınmıştır)
- Yıllık taşınan yolcu sayısı / yol ağı uzunluğu

Markovits-Somogyi ve Bokor (2014), 2009 yılı için 29 Avrupa ülkesinin lojistik etkinliği, yeni geliştirilen DEA-PC (ikili karşılaştırma) yöntemi kullanılarak test edilmiştir ve elde edilen bulgular, klasik DEA yöntemiyle ulaşılan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada; otoyol uzunluğu, demiryolu uzunluğu, kişi başi GSYH, Ulaştırma sektöründe maaşlar ve maddi mallara yapılan brüt yatırımlar girdi değişkeni, karayolu yük hacmi ve demiryolu yük hacmi çıktı olarak belirlenmiştir.

şimşek (2014), OECD üyelerinden 23 ülkenin enerji verimliliğini istenmeyen çıktılarla ölçmek amacıyla; emek, sermaye stoğu ve enerji tüketimi girdileri ile GSYİH (istenen) ve karbondioksit emisyonu (istenmeyen) çıktıları kullanarak 1995-2009 dönemine ait inceleme yapmışlardır. Çalışmada, İtalya ve Meksika'nın dönemin referans setlerinin başında etkin, ancak dönemin referans setlerinin sonunda etkin olmadığı saptanmıştır. Ayrıca ilk yıllarda Avustralya, Kanada, Yunanistan, Güney Kore, Yeni Zelanda, Portekiz, Polonya, İspanya ve Türkiye'nin etkinlik puanları çoğunlukla 0,50'nin altında elde edilmiştir.

Gökgöz ve Erkul (2014), istihdamı da içeren bir verimlilik modeli oluşturarak 23 Avrupa ülkesi için karşılaştırılmalı enerji verimliliği analizi yapmışlardır. 2011-2012



yıllarını içeren çalışmada; VZA (girdi yönlü CCR ve girdi yönlü BCC) yöntemi kullanılmıştır. Girdi olarak iş gücü, enerji tüketimi ve brüt sabit sermaye oluşumu dikkate alınmış, GSYİH ise çıktı olarak kullanılmıştır. Çalışma sonucunda; analiz edilen ülkeler arasında Danimarka, İrlanda ve Norveç'in her iki yılda da tam verimlilik sergilediği ve 2012 yılında Avrupa ülkeleri için ortalama verimlilik skorlarının 2011'den daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Xie ve diğerleri (2014), 1996- 2010 döneminde ülkelerdeki enerji endüstrilerinin dinamik çevresel verimliliklerini incelemişlerdir. Çalışmada VZA, Malmquist Verimlilik Endeksi ve Tobit Regresyon yöntemleri kullanılmıştır. Etkinlik analizinde; nükleer enerji tüketimi, emek, kapasite ve yakıt girdi; enerji üretimi (istenen) ve karbon emisyonu (istenmeyen) çıktı olarak ele alınmıştır. Çalışmada; Fransa ve İsveç'in en etkin ülkeler olduğu, yakıt yapısı değişikliği ve teknolojik yeniliğin ana itici güç olduğu, ekonomik durum ve enerji fiyatları unsurlarının çevrenin verimliliğini etkilediği, diğer taraftan kişi başı GSYİH'nin çevresel verimliliği ters yönlü etkilediği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Apergis ve diğerleri (2015), OECD üyelerinden 20 ülke kapsamında 1985-2011 dönemi için VZA yöntemini kullanarak ülkelerin enerji etkinliklerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada; ABD doları sabit fiyatları ile üretken sermaye stokları, emek, yenilenebilir enerji tüketimi ve yenilenemez enerji tüketimi girdi olarak ele alınırken; çıktı olarak GSYİH ve karbondioksit emisyonu kullanılmıştır. Çalışma sonucunda; ülkelerin verimlilik seviyelerinin yüksek olduğu ve zamanla azaldığı, sermaye yoğun ülkelerin enerji açısından emek yoğun ülkelere göre daha verimli olduğu, aynı zamanda enerji etkinliğinin yükseltilmesi için CO2 salınımının azaltılması, maliyetlerin düşürülmesi, enerji tasarrufu ve enerji güvenliği politikalarının önemli olduğu saptanmıştır. Ayrıca enerji verimliliğinin iyileştirilmesinin; enerji altyapısına yapılan yatırım ihtiyacının azaltılmasına, yakıt maliyetlerinin düşürülmesine, yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalara maruz kalmanın azaltılmasına, rekabet gücünün artmasına,

düşük gelirli haneler için enerji satın alınabilirliğinin artmasına, yerel ve küresel kirleticilerin azalmasına ve tüketicinin refahının iyileşmesine büyük ölçüde yardımcı olabileceği kanaatine varılmıştır.

Rashidi ve Saen (2015), girdileri hem enerji hem de enerji dışı olarak ve çıktıları hem istenen (iyi) hem de istenmeyen (kötü) çıktılara ayırmak için bir VZA modeli kullanarak, OECD'ye üye 19 ülkenin 2012 yılı için çevresel etkinliklerini incelemişlerdir. Girdiler emek ve enerji kullanımı, çıktılar GSYİH ve karbondioksit emisyonudur. Çalışma kapsamındaki ülkeler içinde, Avustralya, Finlandiya, İrlanda, Yeni Zelanda ve İsviçre'nin eko-verimli, geri kalan ülkelerin eko-verimlilik açısından verimsiz olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte enerji tüketimi ile karbondioksit salınımı arasındaki pozitif ve aynı zamanda da yüksek Spearman katsayısının, enerji girdileri ne kadar çok kullanılırsa o kadar istenmeyen çıktılar olduğu hususunu yansıttığına dikkat çekmişlerdir.

Altomonte ve diğerleri (2016), kredi kısıtlamaları, toplam faktör verimliliği, Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge) yatırımları ve ihracat arasındaki karşılıklı ilişkileri incelemişlerdir. İhracat, Ar-Ge ve firma verimliliği arasında karşılıklı pozitif korelasyon olduğu; ihracat, verimlilik ve kredi kısıtlamaları arasında da karşılıklı bir ilişkinin var olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, kredi kısıtlamalarının varlığıyla aracılık edilen ve verimliliği artıran stratejilerin, ihracat ve inovasyon yoluyla elde edilen firma büyümesinin merkezinde olduğuna da vurgu yapmışlardır.

Bian ve diğerleri (2016), Çin Halk Cumhuriyeti'ndeki ekonomik sistemin 1986-2012 dönemi için enerji etkinliğini analiz etmişlerdir. Girdi olarak sermaye stoğu, emek ve birincil enerji tüketimi; çıktı olarak ise GSYİH'nın kullanıldığı VZA yöntemi ile Çin Halk Cumhuriyeti'ndeki ekonomik sistemin verimsizliğinin esas olarak ikincil sanayinin enerji performansının düşüklüğünden kaynaklandığı, enerji verimliliğinin, genel olarak, çalışma süresi boyunca arttığı; ekonomik kalkınmanın ulusal enerji verimliliği üzerinde

olumlu etkileri olduğu, enerji yapısı düzenlemesi ve endüstriyel yapı optimizasyonu ulusal enerji verimliliği üzerinde olumsuz etkilere sahip olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

Meng ve diğerkleri (2016), Çin'in 30 bölgesindeki enerji verimliliği ve karbon emisyonu verimlilik düzeylerini 1995–2012 dönemi kapsamında hesaplamak için; iş gücü, sermaye stoğu ve toplam enerji tüketimi değişkenlerini girdi, GDP (istenen) ve enerji tüketimine bağılı CO2 emisyonlarını (istenmeyen) çıktı olarak ele almışlardır.

Yang ve Yu (2018), Veri Zarflama Analizi ve DEA-Malmquist indeks analiz yöntemlerini kullanarak, 2012–2016 döneminde Çin'in beş büyük yüksek hızlı demiryolu işletmesinin teknolojik inovasyon etkinliğini değerlendirmişlerdir. Ar-Ge harcamaları ve Ar-Ge personel sayısı girdi değişkenleri, patent sayısı, ulusal bilimsel ve teknolojik ödüller ile satış geliri çıktı değişkenleri olarak ele alınmıştır.

Gökgöz ve Güvercin (2018), 2004 ve 2014 dönemi için 14 Avrupa Birliği (AB) ülkesinin, yenilenebilir enerji ve enerji güvenliği arasındaki istatistiksel ilişkiyi araştırmışlardır. Ayrıca, ithalata bağımlılığın azaltılması yoluyla enerji güvenliği açısından yenilenebilir enerji dağıtımlarındaki verimlilik ve üretkenlik açısından nükleer Avrupa Birliği ülkelerini karşılaştırmışlardır. Çalışma VZA (çıktı yönlü BCC -Süper etkinlik modeli), Panel veri analizi ve Sıralı Malmquist-Luenberger Endeksi (SML) yöntemleri çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bulguları, nükleer enerji üreten AB ülkelerinin ortalama yenilenebilir enerji verimliliğinin ve toplam faktör verimliliğinin 2005-2014 yılları arasındaki analiz döneminde arttığını göstermiştir. Nükleer enerji üreten AB ülkelerindeki verimlilik artışının temel nedeninin teknolojik ilerleme olduğu değerlendirilmektedir. Aynı zamanda, yeniliğin teşviki için yenilenebilir enerji ve enerji verimliliğine yapılan büyük Ar-Ge yatırımının önemine dikkat çekilerek; bu hususun AB içinde teknolojik yayılma ve bilgi yayılmasına neden olduğu saptanmıştır.

Ayllón ve Radicic (2019), İspanyol imalat firmalarının üretkenliği, büyümesi ve rekabetçiliği ile ilgili olan ihracat ve teknolojik yeniliklerin sürekliliğini ve karşılıklı

bağımlılığını araştırmıştır. İhracat ve süreç inovasyonunun daha güçlü kalıcılık gösteren iki faaliyet olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Kim ve Shin (2019), çalışan sayısı ve inovasyon harcamaları girdileri, satış geliri çıktısı ile Güney Kore'de faaliyet gösteren 72 lojistik firmasının inovasyon verimliliğini ölçmeyi amaçlamışlardır.

Mavi ve diğerleri (2019a), 2014–2017 dönemi için İran karayolu taşımacılığının çevresel performansını analiz etmişleridir. Girdi değişkenleri olarak; yük tonajı, yol uzunluğu, yakıt tüketimi, kamu yük taşımacılığı araç sayısı, sürücü güvenlik eğitimi ve Ar-Ge harcamaları kullanılmıştır. Çıktı değişkenleri ise; CO<sub>2</sub> emisyonu, yük taşımacılığı hacmi ve trafik kazalarıdır. Sonuçlar, analiz edilen karar birimlerinin büyük çoğunluğunun çevresel etkinlik ve eko-inovasyon açısından sabit kalan veya gerileyen bir eğilim sergilediğini göstermiştir.

Li ve diğerleri (2019), Çin'in yarı iletken sektöründe yenilik teknik, ölçek ve saf teknik verimliliklerini 2009-2014 yılları arasını kapsayan dönem için değerlendirmişlerdir. Araştırmada üç aşamalı Veri Zarflama Analizi modelini kullanmışlardır. Çalışma yapılan sektörde genel inovasyon verimliliğinin arttığı, fakat endüstri zincirinin her segmentinde farklı eğilim ve inovasyon verimliliği seviyeleri gözlenmiştir. Dönem içinde bu farklılıkların azaldığı tespit edilmiştir.

Chang ve diğerleri (2020), 2010-2017 yılları arasında Çin'deki yenilenebilir enerji firmaları üzerinde bir çalışma yürütmüş ve bu şirketlerin genel toplam yatırım verimliliğinin, bir düşüş yaşamadan önce 2010'dan 2017'ye kadar istikrarlı bir şekilde arttığını tespit etmişlerdir.

Gruetzmacher ve diğerleri (2020), 2015–2017 döneminde Avrupa Birliği'ne üye 28 ülkenin ulaştırma sektöründeki çevresel performansını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda; etkinsiz konumda bulunan ülkelerin, ulaştırma sürdürülebilirliğini artırmak için öncelikle sera gazı emisyonlarını ciddi şekilde

azaltması, yük taşımacılığında demiryolu ve su yollarının payını artırması gerektiğine vurgu yapılmıştır.

Liu ve diğerleri (2020), 2009-2014 yılları arasında Çin’de bulunan 30 sanayi şirketi üzerinde, iki aşamalı VZA modeli kullanılarak, Ar-Ge performanslarını değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda; Ar-Ge faaliyetleri açısından nispeten yüksek karlılığa veya yüksek devlet desteğine sahip şirketlerin nispeten düşük performansa sahip olduğu ve Ar-Ge faaliyetlerine gösterilen yüksek ilgi veya güçlü bilimsel araştırma atmosferinin şirketlerin Ar-Ge verimliliğini artırabileceğini öne sürmüşlerdir.

Moutinho ve diğerleri (2020), kentsel hava kirliliğinin kentlerin eko-verimliliğine etkisini analiz etmişlerdir. 24 Alman şehrinin eko-verimlilik skorlarını tahmin etmek için VZA ve stokastik sınır analizi (SFA) kullanılmış; sonraki aşamada, şehir düzeyinde eko-verimlilik puanlarını etkileyen faktörler hakkında sonuç çıkarmak için kesirli regresyon yöntemi uygulanmıştır. 2007, 2010 ve 2013 yılları için yapılan çalışmada, kentsel hava kirlleticilerinin eko-verimlilik üzerindeki olumsuz etkisi olduğu ve yağmurun verimlilik üzerindeki olumlu etkisi olduğu sonucu elde edilmiştir.

Ghanem ve Alam (2020), Türkiye ile Avrupa Birliği ülkelerinin demiryolu etkinliği, Veri Zarflama Analizi (çıktı odaklı CCR ve BCC) yöntemini kullanarak değerlendirilmişlerdir. Toplam hat uzunluğu, çalışan sayısı, demiryolu treni sayısı, altyapı harcamaları ve taşıma faaliyetleri için enerji tüketimi girdi; yolcu ve yük taşımacılığı hacimleri çıktı değişkenleri olarak kullanılmıştır. Türkiye’nin girdi ve çıktıları etkinlik sınırına yakın şekilde kullandığı sonucuna ulaşmışlardır.

Geng ve diğerleri (2021), 24 ülkenin enerji yapılarını daha iyi değerlendirmek için, veri zarflama analizini entegre eden gevşeklik temelli ölçüye dayalı toplam faktör üretkenliği yöntemini kullanan yeni bir statik ve dinamik enerji yapısı analiz yöntemi öne sürmüşlerdir. Dinamik toplam faktör verimliliği analizini Malmquist yöntemi ile elde etmişlerdir. Yenilenebilir enerji, petrol, kömür, hidroelektrik doğalgaz ve nükleer enerji

girdileri ile birlikte, kişi başı GSYİH ve karbondioksit emisyonu çıktı olarak ele alınmıştır. Statik enerji çerçevesine göre, Avrupa'daki gelişmiş ülkelerin performansı genellikle küresel ortalamanın üzerinde seyrederken, Asya'daki gelişmekte olan ülkelerin verimliliği en düşük seviyede olduğu çalışma sonucunda tespit edilmiştir. Verimsiz ülkelerin gevşek değişkenleri açısından, enerji verimliliğinin artırılabilceği ve karbondioksitin azaltılabilceği önerilmiştir.

Fathi ve diğeri (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın amacı; 2015-2017 döneminde fosil yakıt ihraç eden ülkelerdeki çevresel ve ekonomik verimliliği geleneksel Veri Zarflama Analizi (VZA) ve Nash Pazarlık Oyunu yaklaşımı kullanarak incelemektir. Çalışmada; sermaye envanteri, emek ve enerji tüketimi girdi olarak, GSYİH ve karbondioksit emisyonu çıktı olarak kullanılmıştır. VZA yönteminin sonuçlarına göre Brezilya, Çin, Malezya, Umman, Polonya ve Romanya gibi ülkelerin enerji verimliliği 1, diğeri ülkelerin enerji verimliliği 1'den az olduğu tespit edilmiştir. Çevresel faktörlerle ilgili bulgulara dayanarak, Bahreyn, Çin ve Umman en yüksek performansa sahip ülkeler olarak ortaya çıkarken, Arnavutluk, Cezayir, Arjantin, Kolombiya, Gabon, Gürcistan ve Katar gibi diğeri en düşük çevresel verimliliği gösterdiği tespit edilmiştir. Bu ülkelerin yetersiz çevresel faktörler ve yüksek CO<sub>2</sub> emisyon yoğunluğu nedeniyle gerekli verimliliğe sahip olmadıkları vurgulanmaktadır. Çalışmada, Pazarlık oyunu-DEA modeli sonuçlarına göre, her ülkenin farklı puanı olduğu ve ülkelerin optimal noktası belirlendiği ve sıralanması için kullanıldığı belirtilmiştir.

Jain ve Goswami (2021), Güney Asya'daki ülkelerin enerji etkinliğindeki eğilimleri analiz etmiş aynı zamanda bazı belirleyicileri tanımlamışlardır. 1990-2014 dönemi için yapılan çalışma sonucunda; enerji tüketimindeki genel değişikliğin Güney Asya'daki tüm ülkeler için olumlu olduğu, daha fazla enerji kaynaklarına sahip ülkelerin ve ayrıca daha fazla yenilenebilir enerji üreten ülkelerin enerji kullanımında nispeten verimsiz oldukları bulunmuştur. Ayrıca bulgular, yüksek enerji maliyetleri, artan nüfus

yoğunluğu ve daha yüksek kişi başına gelirin enerji verimliliğini teşvik ettiğini göstermiştir.

Akram ve diğerleri (2021), 1990-2014 yılları arasında enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji tüketiminin ekonomik büyüme üzerindeki homojen olmayan etkilerini incelemiştir. Çalışma BRICS ülkeleri kapsamında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, enerji verimliliğinin iyileştirilmesiyle daha verimli enerji kullanımının BRICS ülkelerinde ekonomik büyümeyi artırabileceğini; enerji verimliliğinin BRICS ülkelerinde önemli bir ekonomik büyüme kaynağı olduğunu göstermektedir. Nedensellik analizinden elde edilen bulgular, enerji verimliliği ve ekonomik büyüme arasındaki çift yönlü nedensel bağlantıyı açıklığa kavuşturmaktadır. Bulgular ayrıca yenilenebilir enerji kullanımı ile çalışma konusu ülkelerin ekonomik büyümesi arasındaki çift yönlü nedensel bağlantıyı da açıklığa kavuşturmaktadır. Ayrıca enerji etkinliğinin yenilenebilir enerji kullanımının geliştirilmesinde yardımcı olduğu öne sürülmüştür.

Lan ve diğerleri (2022), çalışmada çevresel değişkenlerin Çinli fotovoltaik kuruluşların inovasyon etkinliği üzerindeki gerçek etkisini bulmak için, dış faktörlerin de etkisini dikkate alarak, üç aşamalı VZA modeli benimsenmişlerdir. Çinli güneş enerjisi firmalarının ortalama inovasyon etkinliğinin 0,567 olduğu keşfedilmiştir. Çinli güneş enerjisi firmalarının zayıf inovasyon ölçeği etkinliğinin, düşük inovasyon etkinliklerinden birincil derecede sorumlu olduğunu öne sürmüşlerdir. Aynı zamanda; bir şirketin toplam varlıklarının büyüklüğünün ve yaşının inovasyon etkinliği üzerinde faydalı bir etkiye sahip olduğunu, devlete ait mülkiyet hakları, öz sermaye yoğunlaşması, devlet sübvansiyonları ve internet penetrasyonunun fotovoltaik firmaların gelişimini sınırladığını ortaya koymaktadırlar.

Domagala ve Kadłubek (2022), karayolu yük taşımacılığı sektörünü Veri Zarflama Analizi (DEA) kullanılarak kapsamlı bir değerlendirmesini yapmışlar.

Çalışmanın sonucunda 10 Avrupa Birliği üyesi ülkenin ulaştırma sektörlerini verimli bir şekilde yönettiğini, ekonomik ve çevresel hedefleri dengelediğini ortaya koymuşlardır.

Wang ve diğerleri (2022), 25 Ekonomik Kalkınma ve İş birliği Teşkilatı (OECD) ülkesinde kara taşımacılığı faaliyetlerinin çevresel etkinliğini değerlendirmek amacıyla, 2015–2019 dönemi kapsamında istenmeyen çıktıları da dikkate alan Veri Zarflama Analizi (VZA) temelli bir model önermiştir. Çalışmanın bulguları, kara taşımacılığı açısından en yüksek çevresel etkinlik skorlarına sahip ülkeler arasında İsviçre, İspanya, İtalya, Fransa, Japonya, Avustralya, Kore, Litvanya, Hollanda, İsveç, Amerika Birleşik Devletleri ve Polonya'nın yer aldığını ortaya koymuştur.

Zhu ve diğerleri (2022), birden fazla VZA yöntemi kullanarak AB ülkelerinin çevresel etkinliğini 2013-2019 dönemi için analiz etmiştir. Çalışmada; girdi değişkenleri nüfus, enerji tüketimi ve sermaye stoğu; çıktı değişkeni olarak da Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GDP) ile sera gazı emisyonları (GHG) kullanılmıştır.

Antunes ve diğerleri (2023), Çin'e ait 29 eyaletin 14 yıllık dönem için karayolu taşımacılığı sürdürülebilirlik performansını değerlendirmek amacıyla; işgücü, sermaye, enerji tüketimi, CO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> değişkenlerini girdi, GDP değişkenini çıktı olarak kullanmışlardır.

Andrijauskiene ve diğerleri (2023), 2000-2020 yılları arasında Avrupa Birliği ülkelerinin inovasyon etkinliğini değerlendirmişlerdir. Araştırma yöntemi olarak veri zarflama analizini kullanmışlar ve söz konusu ülkelerin genel inovasyon verimliliklerinin zaman içinde iyileştiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca çalışmada Lüksemburg'un inovasyon verimliliği konusunda mutlak lider olduğunu öne sürmüşlerdir.

En kirli 15 Avrupa ekonomisinin incelenmesi, yeni ulaşım teknolojilerinin benimsenmesi nedeniyle emisyonlarda uzun vadeli bir azalma olduğunu göstermektedir (Khurshid ve diğerleri, 2023).



Juracka ve diğeri (2024), ÷lkelerin 2013-2022 yılları arası dñnemi kapsayan, eko-inovasyon etkinliklerini analiz etmişlerdir. Avrupa ÷lkeleri düzeyinde yapılan bu çalışma sonucunda, Kuzey Avrupa ÷lkelerinin son yıllarda inovasyon alanında lider konumda olduklarını tespit etmişlerdir.

Liu ve diğeri (2024), Çin eyaletlerinde 2007-2021 dönemine ilişkin ulaştırma istenmeyen çıktılar (örneğin karbon emisyonları) içeren süper-etkinlik temelli SBM-DEA modeli kullanarak ulaştırma sistem verimliliğini incelemişlerdir. Girdi değişkenleri olarak çalışan sayısı, maaşlar, hat uzunluğu, araç sayısı ele alınırken, çıktı olarak toplam petrol tüketimi, yolcu hacmi, yük hacmi ve ulaştırma sektörü kamu harcamaları belirlenmiştir.

Song ve Zhang (2025), Çin'in 30 eyaleti için 2012–2022 döneminde ulaştırma sektörüne ait karbon dioksit emisyon etkinliğini ölçmek için, Süper etkinlik modeli ve Tobit regresyon analizi yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmada; sermaye stoku (yatırım), işgücü (çalışan sayısı), enerji tüketimi girdi değişkenleri olarak; ulaştırma sektörünün katma değeri (istenen) ve CO<sub>2</sub> emisyonları (istenmeyen) çıktı olarak kullanılmıştır. Araştırma bulgularına göre; yük taşımacılığı hacmi, ulaştırma altyapısının düzeyi ve teknolojik ilerleme, ulaştırma sektöründe karbon dioksit emisyon etkinliği üzerinde anlamlı ve pozitif etki yaratmaktadır. Çalışmada ayrıca; seyahat modlarının optimize edilmesi, altyapı inşaatının iyileştirilmesi, yük taşımacılığının artırılması ve teknolojik ilerlemenin teşvik edilmesi gibi politika önerileri sunulmuştur.

## İKİNCİ BÖLÜM

### ETKİNLİK VE ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

#### 2.1. Etkinlik ve Verimlilik

Performans (performance), karar verici birimlerin davranışlarının zaman veya mekân faktörlerine göre karşılaştırılmasını amaçlar. Bu faktörlerin her ikisinde birden de performans ölçümü yapılabilir. Bu karşılaştırmalar, sektör ya da ülke gibi unsurların içinde yapılabileceği gibi, sektörler arası ya da ekonomiler arasında da gerçekleştirilebilir. Verimlilik (productivity); birimlerin faaliyetleri sürecinde kullanılan girdilerle, elde edilen çıktıları değerlendirilmesidir, özetle çıktı ile girdi arasındaki orandır (De Borger ve diğerleri, 2002; Jarboui ve diğerleri, 2012).

Verimlilik, belirli bir zamanda veya mekânda ya da her ikisinde birden ne kadar iş yapılabilirdiğini gösterirken; etkinlik (efficiency), kaynakların ne kadar iyi kullanılıp kullanılmadığının ölçülmesine olanak sağlar. Etkinliği artırmak; bir ürünün daha az kaynak kullanarak elde edilmesi ya da aynı kaynakları kullanarak daha fazla çıktı elde edilmesidir.

Etkinlik ölçümü konusu; 1951 yılında Koopsman tarafından teknik etkinliğin tanımlanmasıyla başlamış ve onu yine 1951’de Debreu (kaynak kullanımı katsayısı) ile 1957 yılında da Farrell izlemiştir (Algin ve Tezsürücü, 2014). Farrell (1957), her ne kadar firma düzeyinde ölçüm geliştirmiş olsa da bu metodoloji daha büyük düzeyde ekonomilere de uygulanabilir (Farrell, 1957).

Gelinen son noktada; etkinliği teknik, tahsis(yapısal) ve ölçek etkinleri olarak sınıflandırmak mümkündür.

Teknik etkinlik; girdileri çıktılarına dönüştürmeye yönelik tüm teknolojik olasılıkları özetleyen üretim olasılıkları kümesinin sınırında üretim olarak tanımlanabilir. Yapısal etkinlik olarak da adlandırılan tahsis etkinliği; miktar ve fiyat sınırlılıkları göz

önüne alındığında, karar verici birimlerin belirlediği davranışsal bir amacı üretim olasılıkları kümesinin üzerinde karşılayan noktadır. Ölçek etkinliği ise; gerçekleşen ile olması gereken arasındaki olası bir sapma ile ilgilidir ve bir ekonominin optimal büyüklüğünü ifade eder. Getiriler ölçeğe göre; sabit, artan ya da azalan şeklinde olabilir. Ölçeğe göre azalan getiri; kullanılan kaynaklarda meydana gelen değişimin, çıktılardaki değişime göre daha yüksek olduğu durumu ifade eder. Artan getiri ise bu durumun tam tersidir (De Borger ve diğerleri, 2002)

Ulaştırma sektöründe yapılan etkinlik çalışmalarına bakıldığında genellikle teknik etkinlik üzerine yoğunlaşıldığı görülmektedir (De Borger ve diğerleri, 2002).

Herhangi bir sektörün etkinliğinin (özellikle göreceli etkinliğinin) ölçülmesi karar vericiler açısından kritik öneme sahiptir. Kıt kaynaklarla yaşamını sürdüren ekonomiler için girdilerini artırmadan çıktıları ne denli artıracaklarını bilmek ve geliştirmek rekabetin çok yüksek olduğu küresel ortamda daha ileri gitmeleri için gereklidir. Bu durum elbette ulaşım sektörü için de kaçınılmazdır.

Geleneksel etkinlik ölçüm yaklaşımları, genellikle firmaların ya da sektörlerin piyasada satılabilir çıktılarının, üretim sürecinde kullanılan ücretli üretim faktörlerine oranlanması esasına dayanmaktadır. Ancak bu yöntem, üretim sürecinin bir yan ürünü olarak ortaya çıkan çevresel etkileri göz ardı ettiği için, verimlilik artışlarını doğru yansıtmayabilir. Özellikle çevresel düzenlemelere tabi olan sektörlerde faaliyet gösteren firmalar için, bu durum daha belirgin hale gelmektedir. Çünkü çevreye yönelik maliyetler girdi olarak hesaba katılmakta, ancak bu yatırımların sonucunda elde edilen emisyon azalımı gibi çevresel iyileşmeler çıktı tarafında değerlendirilmemektedir. Bu da çevresel performansı iyileştirmeye yönelik çabaların, geleneksel verimlilik analizlerinde haksız şekilde negatif yansıtılmasına neden olabilmektedir (Chung ve diğerleri, 1997). Ulaştırma sektöründe sera gazı emisyonları gibi çevresel zararların azaltılması hususunun son derece önemli olması nedeniyle istenmeyen çıktılar çalışma kapsamına alınmıştır.

## 2.2. Veri Zarflama Analizi

Veri Zarflama Analizi (VZA) ve Stokastik Sınır Analizi, bir sektörün etkinliğini ölçmek için en yaygın ve sağlıklı sonuçlar elde edilen iki yaklaşımdır. Stokastik Sınır Analizi parametrik bir yöntem iken; Veri Zarflama Analizi, birden fazla girdi ve birden fazla çıktısı olan birimlerin etkinliğinin saptanması için uygulanan parametrik olmayan bir metodolojidir (De Borger ve diğerleri, 2002). VZA, KVB'lerin göreceli verimliliğini ölçme amacıyla kullanılan çok faktörlü bir verimlilik analizi modelidir (Lee ve Park, 2005).

Veri Zarflama Analizi (VZA), karar vericiler için popüler ve kullanışlı bir matematiksel yöntemdir ve verimlilik düzeylerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır (Gökgöz ve Erkul, 2014). Temelleri 1957 yılında Farrell tarafından atılan bu yöntem başlangıçta, birden fazla kriter içeren ve fiyat bilgilerinin mevcut olmadığı durumlarda performans değerlendirmesi için parametrik olmayan, matematiksel bir programlama yaklaşımı olarak geliştirilmiştir (Charnes ve diğerleri, 1978; Charnes ve diğerleri, 1984; Kuosmanen ve Kortelainen, 2005; Tsaples ve Papathanasiou, 2021). Veri Zarflama Analizi yönteminin bankacılıktan enerji sektörüne geniş bir kullanım alanı vardır. Veri zarflama analizi, inovasyon verimliliği değerlendirmesi için güvenilir bir araç olduğunu kanıtlamıştır (Andrijauskiene ve diğerleri, 2023).

Yöntemin avantajları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir (Gökgöz, 2009; Türkoğlu, 2016):

- Birden fazla girdi ve çıktının eş zamanlı kullanımı mümkündür,
  - Ele alınan girdiler ve çıktıların ölçü birimlerinin aynı olması gerekmez,
  - Girdi ile çıktı arasındaki ilişkiyi tanımlayan ayrı bir işlevsel çerçeve oluşturmaya gerek yoktur,
  - Bu araç öznel bir değerlendirme mekanizması olarak işlev görmez.
- Etkinlik değerlerinin ölçülebilir verilerden türetildiği göz önüne

alındığında, bu değerler karar vericilerin öznel bakış açılarından etkilenmez,

- Etkin ve etkin olmayan şeklinde kategorize eder,
- Etkin olmayan karar verme birimleri için bu etkinsizliğin neden meydana geldiği konusunda bilgi verir.

Veri zarflama analizinin uygulanmasında öncelikle Karar Verici Birimlerin (KVB) seçilmesi gerekir. Sonrasında analizde kullanılacak girdi ve çıktılar belirlenir. Bu aşamanın ardından verilerin sağlanması ve elde edilen bu verilerin güvenilirliğinin test edilmesi gerekir. Çalışma konusuna uygun model ile görelî etkinlik ölçülür ve elde edilen sonuçlar değerlendirilir (Türkoğlu, 2016).

Temel Veri Zarflama Analizi modelleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Kıran, 2008):

- CCR modelleri,
- BCC modelleri,
- Toplamsal model,
- Aylak tabanlı ölçüm modeli,
- Süper aylak tabanlı model.

Veri Zarflama Analizi girdi ya da çıktı yönlü olmalarına göre sınıflandırılabilir. Karar verici birimlerin girdi üzerinde etkisi olması halinde girdi yönlü VZA ile; karar verici birimlerin çıktılar üzerinde kontrolü olması halinde ise çıktı yönlü VZA modelleri ile analiz yapılmaktadır (Kıran, 2008; Türkoğlu, 2016).

### **2.2.1. CCR Modeli**

Veri Zarflama Analizinin temelini CCR modeli oluşturmaktadır. Modeli, Charnes, Cooper ve Rhodes literatüre kazandırmıştır. Ancak, kesirli programlama, verimlilik ölçüm sonuçlarını oluşturmak için çok tartışılan bir yöntemdir. Biri, mevcut çıktı düzeyine ulaşacak biçimde girdileri azaltmaya çalışan girdi odaklı bir model, diğeri

ise mevcut girdilerden optimal girdi kombinasyonunu kullanarak çıktıları arttırmaya çalışan çıktı odaklı model olmak üzere iki çeşit CCR modeli bulunmaktadır (Kıran, 2008).

### **2.2.2. BCC Modeli**

CCR modelinin uygulanmasında yaşanan aksaklıklar üzerine Banker, Charnes ve Cooper 1984 yılında CCR modelini farklılaştırarak yeni bir VZA modeli elde etmişlerdir. Temelde bu, ölçeğe göre değişken getiri varsayımına dayalı olarak teknik verimliliği değerlendiren bir yapıya işaret etmektedir. BCC etkin sınırı, durum ne olursa olsun her zaman CCR sınırının altında kalmaktadır. Sonuç olarak, CCR modelinden elde edilen etkinlik değeri BCC modelinden elde edilenden ya daha düşük ya da ona eşittir.

### **2.3. İstenmeyen Çıktılar İle Veri Zarflama Analizi**

Veri Zarflama Analizi (VZA) kapsamında geliştirilen istenmeyen çıktı modelleri, analiz sürecinde çevresel açıdan olumsuz etkileri temsil eden çıktıları da dikkate alarak etkinlik değerlendirmesine daha bütüncül bir yaklaşım getirir. Bu tür modellerde, etkinlik düzeyinin belirlenmesinde yalnızca arzu edilen çıktının artırılması değil, aynı zamanda istenmeyen çıktının ve girdi kullanımının azaltılması da esas alınmaktadır. Bu yaklaşıma göre, birimlerin daha az kaynak kullanarak ve çevresel zararı minimize ederek daha yüksek düzeyde faydalı çıktı üretmeleri, daha yüksek bir çevresel etkinlik düzeyine işaret etmektedir (Wang ve diğerleri, 2022).

Klasik Veri Zarflama Analizi (DEA) modelleri, üretim birimlerinin etkinliğini değerlendirirken genellikle girdilerin sabit tutulması koşuluyla çıktıların maksimize edilmesini ya da çıktılar sabitken girdilerin minimize edilmesini esas alır. Ancak çevresel verimliliğin ölçülmesi söz konusu olduğunda, özellikle sera gazı (GHG) emisyonları gibi istenmeyen çıktılar analiz kapsamına alındığında, bu geleneksel çerçevenin yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu bağlamda, modelin yapısal olarak yeniden kurgulanması gerekmektedir. Literatürde bu duruma yönelik iki temel yaklaşım öne çıkmaktadır: İlki, mevcut girdi düzeyi korunarak hem arzu edilen çıktının artırılması hem de istenmeyen

çıktının azaltılması hedeflenir; ikincisinde ise, arzu edilen çıktı sabit kabul edilerek, girdilerle birlikte çevresel açıdan olumsuz etkiler yaratan çıktılar da en aza indirgenmeye çalışılır. Bu yaklaşımlar, çevresel etkinliğin daha bütüncül ve gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Zhu ve diğerleri, 2022).

İstenmeyen çıktılar altında üretim etkinliğinin ölçülmesine yönelik tartışmalar, performans ölçüm literatüründe 1980’li yıllardan itibaren önem kazanmaya başlamıştır. Bu alandaki ilk kapsamlı katkılardan biri, Pittman’ın (1983) çalışmasıdır. Pittman, Caves ve arkadaşları (1982) tarafından geliştirilen çok taraflı verimlilik endeksini hem arzu edilen çıktıları hem de istenmeyen çıktıları dikkate alacak şekilde genişletmiştir. Caves vd.’nin önerdiği endeks, analizde fiyat bilgisine ihtiyaç duyuyordu; ancak istenmeyen çıktılar için piyasa fiyatlarının çoğu durumda mevcut olmaması önemli bir kısıttı. Bu soruna çözüm olarak Pittman, istenmeyen çıktıları gölge fiyatlar atayarak bu verimlilik göstergesini yeniden yapılandırmıştır. Daha sonra Färe ve arkadaşları (1993), Shephard’ın (1970) tanımladığı mesafe fonksiyonu çerçevesini temel alarak, gölge fiyatların tahmini için alternatif bir yaklaşım sunmuştur. Fare vd. tarafından önerilen bu model, doğrusal programlama teknikleri aracılığıyla istenmeyen çıktıları ait gölge fiyatların belirlenmesine olanak tanımış ve bu yönüyle Pittman’ın yaklaşımına yöntemsel bir derinlik kazandırmıştır (Zanella ve diğerleri, 2015).

Çevresel etkilerin dikkate alındığı etkinlik analizlerinde, istenmeyen çıktıları başa çıkmak amacıyla literatürde farklı modelleme yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlardan biri, çevresel zararı temsil eden çıktıları girdi değişkeni gibi değerlendirmeyi önermektedir. Ancak bu yaklaşım, söz konusu çıktının üretim sürecinin ayrılmaz bir parçası olduğunu göz ardı ettiği için üretim teknolojisinin doğasıyla çelişmektedir. Alternatif olarak, bazı çalışmalarda istenmeyen çıktılar pozitif değerlere dönüştürülerek, klasik çıktı değişkenleriyle benzer biçimde analiz edilmektedir. Ancak her iki yaklaşım da çıktının yapısal özelliklerini dönüştürdüğü için, istenmeyen çıktıları

modelleme sürecine dolaylı olarak dahil etmektedir (Seiford & Zhu, 2002; Zhu ve diğerleri, 2022; Chen ve diğerleri, 2019).

Buna karşın, literatürde bazı yöntemler çıktıların biçimini değiştirmeye gerek kalmaksızın doğrudan uygulamaya olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, Fare, Grosskopf, Lovell ve Pasurka'nın (1989) önerdiği ve “zayıf yok edilebilirlik” (weak disposability) ilkesine dayanan teknolojik yaklaşım dikkat çekicidir. Bu ilkeye göre, istenmeyen çıktılar istenildiği zaman tamamen ortadan kaldırılamaz; yalnızca belirli koşullar altında azaltılabilir. Bu çerçeveyi temel alan Chung ve arkadaşları (1997), arzu edilen çıktılar artırılırken istenmeyen çıktılarda azalma sağlayan yönlü mesafe fonksiyonunu (directional distance function) literatüre kazandırmışlardır. Söz konusu yöntem, izleyen yıllarda çevresel etkinlik çalışmalarında yaygın biçimde benimsenmiştir (Zhu ve diğerleri, 2022).

#### **2.4. Veri Zarflama Analizi ve Çevresel Etkinlik**

Veri Zarflama Analizi, mevcut veri setine ve bazı öncül varsayımlara dayanarak ampirik bir etkinlik yüzeyi (efficient frontier) oluşturur. Eğer bir karar birimi bu yüzey üzerinde yer alıyorsa, bu birim "etkin" olarak kabul edilir; yüzeyin altında kalanlar ise "etkin olmayan" birim olarak değerlendirilir. Etkin olmayan birimler için VZA modeli bir referans seti belirler ve bu set, etkin birimlerden oluşur ve analiz edilen birimin etkin yüzeyde ulaşması gereken hedef konumunu tanımlar. VZA'da etkin olmayan bir karar birimi, bu yüzeye radyal bir projeksiyonla yansıtılarak elde edilen sanal hedef birim (target unit) ile karşılaştırılır. Ancak, küresel çevre koruma bilincinin artmasıyla birlikte, üretim ve sosyal faaliyetlerin ortaya çıkardığı istenmeyen çıktılar (undesirable outputs) (hava kirleticiler ve tehlikeli atıklar) giderek daha fazla tehdit oluşturmaya başlamıştır. Bu nedenle, daha az istenmeyen çıktı üreten teknolojilerin geliştirilmesi, üretimin her alanında önemli bir konu hâline gelmiştir. VZA modelleri genellikle daha az girdi ile daha fazla çıktı üreten birimleri etkin kabul eder. Oysa istenmeyen çıktılar söz konusu



olduğunda, daha az kötü çıktı, daha fazla iyi çıktı ve daha az girdi ile üretim yapan teknolojiler etkin olarak değerlendirilmelidir (Ebrahimenjad, 2011).

Pek çok bilimsel çalışmada farklı çevresel etkinlik ölçüm yöntemleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve bu değerlendirmeler sonucunda, parametrik olmayan yapısıyla dikkat çeken Veri Zarflama Analizi (VZA) yaklaşımının, çevresel etkinlik analizlerinde en yaygın tercih edilen yöntemlerden biri olduğu ortaya konmuştur. VZA modeli, özellikle istenmeyen çıktıları da dikkate alabilen esnek yapısı sayesinde, çevre performansının ölçümünde güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda yapılan kapsamlı literatür taramaları da, VZA yönteminin çevresel etkinlik değerlendirmelerinde metodolojik olarak sağlam ve ampirik olarak uygulanabilir bir çerçeve sunduğunu doğrulamaktadır (Wei ve diğerleri, 2021; Guanglan ve Zhening, 2024).

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### AMPİRİK ÇALIŞMA VE BULGULAR

#### 3.1. Yöntem

VZA, aynı üretim teknolojisine tabi karar birimlerinin (KVB) göreceli etkinliklerini ölçmek için parametrik olmayan bir yöntemdir (Charnes ve diğerleri, 1978). Bu çalışmada, ülkeler birer KVB olarak kabul edilmekte ve ulaştırma sektörüne ilişkin çoklu girdi ve çıktı değişkenleri temelinde değerlendirmeye alınmaktadır.

Ulaştırma sektörünün enerji yoğun ve çevresel açıdan yüksek emisyon üreten bir sektör olması sebebiyle, yalnızca üretim çıktılarıyla değil, aynı zamanda istenmeyen çıktılarla da (örneğin CO<sub>2</sub> emisyonları) etkinlik ölçümü yapılması önem arz etmektedir. Bu nedenle, çalışma kapsamında yapılan analizde, ulaştırma sektöründe çevresel etkinliği ekonomi, altyapı ve inovasyon bağlamlarında ölçmek amacıyla, istenmeyen çıktıları içeren çıktı yönelimli BCC modeli - Output-oriented BCC model with undesirable outputs (O-BCC-UO)

- BCC modeli: Banker, Charnes ve Cooper tarafından geliştirilen, değişen ölçeğe göre getiri varsayımına (VRS) dayalı bir VZA modelidir.
- Çıktı yönelimli (output-oriented): Amaç, mevcut girdiler sabitken çıktıları mümkün olduğunca artırmaktır.
- İstenmeyen çıktılar (undesirable outputs): Karbon emisyonları, trafik kazaları, atık gibi performansın düşmesini istediğimiz çıktılardır.

Banker, Charnes ve Cooper (1984) tarafından geliştirilen BCC modeli, ölçeğe göre değişken getiri-Variable Returns to Scale (VRS) varsayımına dayanır ve karar birimlerinin ölçek açısından etkin olup olmadığını da dikkate alır. Bu model, karar verme birimlerinin her zaman optimal üretim ölçeğinde faaliyet göstermeyebileceğini kabul eder. Söz konusu optimal olmayan koşullar; finansman yetersizlikleri, piyasa yapısındaki

aksaklıklar, devlet müdahaleleri veya eksik rekabet gibi çeşitli dışsal ve içsel kısıtlamalardan kaynaklanabilir. VRS varsayımı altında, üretim sürecinde kullanılan girdilerin aynı oranda artırılması, çıktılarda aynı oranda bir artışa yol açmak zorunda değildir. Bu nedenle BCC modeli, sabit getiri varsayımı (CRS) altında elde edilemeyecek daha esnek ve gerçekçi etkinlik ölçümleri sunar (Gökgöz ve Güvercin, 2018)

Bu tezde kullanılan modellerde istenmeyen çıktılar negatif yönlü etki yarattığı için modellerin çıktı seti istenen ve istenmeyen olmak üzere ikiye ayrılmıştır.

Bu yapı, yalnızca teknik etkinliği değil, aynı zamanda çevresel ve kaynak kullanımı açısından sürdürülebilir etkinlik düzeylerini ölçmek için de uygun bir analitik zemin sunmaktadır.

### 3.2. Karar Verme Birimleri ve Değişkenler

#### 3.2.1. Karar Verme Birimlerinin Belirlenmesi

Veri Zarflama Analizi uygulamalarında karar verme birimlerinin (KVB) karşılaştırılabilir ve benzer özelliklere sahip olması gerekmektedir. Aynı zamanda girdi ve çıktı toplamından fazla sayıda KVB'nin olması önerilmektedir (Gökgöz, 2009).

Analiz kapsamında Avrupa Birliği'ne üye ülkeler 2023 yılı GDP (ulaştırma sektörü) değerlerine göre sıralanmıştır. Çalışma çerçevesinde verileri tam ve sürekli olan 24 AB ülkesi Karar Verme Birimleri olarak belirlenmiş ve Tablo 4'te gösterildiği şekilde ilk 12 ülke (Grup 1) olarak, son 12 ülke (Grup 2) olarak gruplandırılmıştır.

**Tablo 4.** Karar Verme Birimleri ve Gelişmişlik Sıralamaları

| Grup 1   |                | Grup 2     |                |
|----------|----------------|------------|----------------|
| KVB      | GDP Sıralaması | KVB        | GDP Sıralaması |
| Almanya  | 1              | Çekya      | 13             |
| Fransa   | 2              | Finlandiya | 14             |
| İtalya   | 3              | Portekiz   | 15             |
| İspanya  | 4              | Macaristan | 17             |
| Hollanda | 5              | Slovakya   | 18             |

|           |    |             |    |
|-----------|----|-------------|----|
| Polonya   | 6  | Bulgaristan | 19 |
| Belçika   | 7  | Lüksemburg  | 20 |
| İsveç     | 8  | Hırvatistan | 21 |
| İrlanda   | 9  | Litvanya    | 22 |
| Avusturya | 10 | Slovenya    | 23 |
| Danimarka | 11 | Letonya     | 24 |
| Romanya   | 12 | Estonya     | 25 |

### 3.2.2. Değişkenlerin Belirlenmesi

Ulaştırma sektöründe VZA uygulamaları, seçilecek girdi ve çıktılar açısından dikkatli değişken tanımları gerektirir. Bu çalışmada girdi ve çıktı değişkenlerinin seçimi hem teorik literatür hem de benzer ampirik çalışmalardan elde edilen uygulama örneklerine dayanmaktadır. Değişkenlerin belirlenmesinde Avrupa Birliği ülkelerinin çevre ile ilgili hedefleri de dikkate alınmıştır.

Çalışma kapsamında değişken seçimi yapılırken geniş literatür taraması yapılmıştır. Her bir model için ayrı ayrı değerlendirme yapılmış ve uygun olmayanlar elenmiştir. Analiz kapsamında kullanılan girdi ve çıktı değişkenleri, birimleri, literatür temelleri ve veri kaynakları Tablo 5’te sunulmuştur.

**Tablo 5.** Değişken Bilgileri

| Değişken Türü | Değişkenler            | Kısaltma | Birim                          | Yararlanılan Literatür                                                                                                                                          | Veri Kaynağı |
|---------------|------------------------|----------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Girdi         | İş Gücü                | LF       | Bin Kişi                       | Park ve diğerleri (2018), Song ve Zhang (2025), Guanglan ve Zhening (2024), Domagała ve Kadłubek (2022), Li ve diğerleri. (2021), Stefaniec ve diğerleri (2021) | Eurostat     |
| Girdi         | Toplam Enerji Tüketimi | FEC      | Bin ton petrol eşdeğeri (ktoe) | Park ve diğerleri (2018), Song ve Zhang (2025), Guanglan ve Zhening (2024), Zhu ve diğerleri (2022), Li ve diğerleri. (2021), Stefaniec ve diğerleri (2021)     | Eurostat     |

|       |                           |      |                                     |                                                                                                                                        |                                                    |
|-------|---------------------------|------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Girdi | Hat Uzunluđu              | LTN  | Km                                  | Domagała ve Kadłubek (2022), Stefaniec ve diđerleri (2021), Wang ve diđerleri (2022), Fancello ve diđerleri (2014)                     | Eurostat ve OECD                                   |
| Girdi | Brüt Sermaye Oluşumu      | GFCF | Milyon Avro                         | Wang ve diğerleri (2022), Fancello ve diğerleri (2014)                                                                                 | Eurostat                                           |
| Girdi | Toplam Araç Sayısı        | TAS  | Adet                                | Domagała ve Kadłubek (2022), Stefaniec ve diđerleri (2021)                                                                             | Eurostat ve Statistical Pocketbook                 |
| Girdi | İnovasyon endeksi         | II   | Birim Yok                           | Antunes ve diğerleri (2023)                                                                                                            | Avrupa Komisyonu                                   |
| Çıktı | Gayri Safi Yurtiçi Hasıla | GDP  | Milyon Avro                         | Park ve diğerleri (2018), Guanglan ve Zhening (2024), Zhu ve diğerleri (2022), Geng ve diğerleri (2021)                                | Eurostat                                           |
| Çıktı | Yük Tařımacılığı Hacmi    | FTV  | Milyon Ton-Kilometre (TKM)          | Domagała ve Kadłubek (2022), Su ve Rogers (2012), Li ve diđerleri. (2021), Wang ve diđerleri (2022), Mavi ve diđerleri (2019a)         | Eurostat                                           |
| Çıktı | Sera Gazı Emisyonları     | GHG  | Milyon Ton CO <sub>2</sub> Eřdeđeri | Domagała ve Kadłubek (2022), Zhu ve diđerleri (2022), Stefaniec ve diđerleri (2021), Gökğöz ve Yalçın (2025), Shen ve diđerleri (2011) | Eurostat (European Environment Agency (EEA)-EDGAR) |
| Çıktı | Trafik Kazaları           | TA   | Adet                                | Stefaniec ve diğerleri (2021), Fancello ve diğerleri (2014), Shen ve diğerleri (2011), Mavi ve diğerleri (2019a)                       | Eurostat, OECD ve Statistical Pocketbook           |

Çalışma kapsamında kullanılan veriler; Eurostat veri tabanı, OECD veri tabanı, Eurostat tarafından yayımlanan (Avrupa Birliği ulaştırma, enerji, emisyon, altyapı, kaza, istihdam istatistiklerinin yer aldığı) Statistical Pocketbook ve Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan Avrupa İnovasyon Endeksi Raporundan elde edilmiştir.

Çalışmada kullanılan veriler (inovasyon endeksi hariç) ulaştırma sektörü (karayolu ulaştırması modunda) 2023 yılı için toplanmıştır.

### 3.3. Araştırma Modelleri

Bu çalışmada; 2023 yılı için ulaştırma sektöründe karayolu taşımacılığı çerçevesinde, çevresel etkinliği ekonomik, altyapı ve inovasyon bağlamlarında incelemek üzere 3 model kullanılmıştır. Modellerin oluşturulmasında literatür araştırması ile birlikte Avrupa Birliği kapsamında belirlenen çevre politika ve hedefleri göz önünde bulundurulmuştur.

Modeller ve değişken yapılarına ait bilgiler aşağıda alt başlıklar halinde sunulmuştur. Bu değişken yapıları, ulaştırma sektörünün ekonomik, altyapısal ve inovasyon ile birlikte çevresel çıktılarla değerlendirilmesine olanak tanıyan çok yönlü bir analiz çerçevesi sunmaktadır. Böylece yalnızca teknik verimlilik değil, sürdürülebilirlik açısından da etkinlik düzeyleri ölçülebilecektir.

#### 3.3.1. Ekonomi Bağlamında Çevre Etkinliği-Model 1

Birinci Model’de Avrupa Birliği ülkelerinin (KVB’ler) karayolu taşımacılığı çevresel etkinliği ekonomi temelinde ele alınmıştır. KVB’ler, Tablo 4’te belirtilen Grup 1 ve Grup 2 şeklinde ayrılmış 24 Avrupa Birliği ülkesinden oluşmaktadır.

Bu kapsamda Model 1’in yapısı kullanılan girdi ve çıktı değişkenleri Tablo 6’da gösterilmiştir. İki girdi değişkeni, biri istenmeyen olmak üzere iki çıktı değişkeni ile model oluşturulmuştur.

**Tablo 6.** Model 1 değişken yapısı

| MODEL 1  |            |                                |
|----------|------------|--------------------------------|
| Girdiler |            | İş Gücü (LF)                   |
|          |            | Toplam Enerji Tüketimi (FEC)   |
| Çıktılar | İstenen    | Gayrisafi Yurtiçi Hasıla (GDP) |
|          | İstenmeyen | Sera Gazı Emisyonları (GHG)    |

Etkinlik analizinde kullanılan değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri Grup 1 için Tablo 7’de Grup 2 için ise Tablo 8’de sunulmuştur.

**Tablo 7.** Tanımlayıcı İstatistikler (Model 1 Grup 1)

| Değişkenler    | LF<br>(Bin Kişi) | FEC<br>(Bin Ton Petrol<br>Eşdeğeri ) | GHG<br>(Milyon Ton<br>CO <sub>2</sub> Eşdeğeri) | GDP<br>(Milyon Avro) |
|----------------|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------|
| Maksimum       | 2070,4           | 49196,83                             | 146,0795                                        | 4185550              |
| Minimum        | 113,2            | 3960,154                             | 11,79763                                        | 324368,6             |
| Ortalama       | 748,3167         | 19528,65                             | 55,46246                                        | 1273218              |
| Standart Sapma | 608,1093         | 16129,14                             | 47,06325                                        | 1151242              |

**Tablo 8.** Tanımlayıcı İstatistikler (Model 1 Grup 2)

| Değişkenler    | LF<br>(Bin Kişi) | FEC<br>(Bin Ton Petrol<br>Eşdeğeri ) | GHG<br>(Milyon Ton<br>CO <sub>2</sub> Eşdeğeri) | GDP<br>(Milyon Avro) |
|----------------|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------|
| Maksimum       | 312,7            | 7027,81                              | 19,89658                                        | 317385,8             |
| Minimum        | 13,1             | 845,79                               | 2,64795                                         | 38187,8              |
| Ortalama       | 143,99           | 3158,80                              | 9,031777                                        | 137407,7             |
| Standart Sapma | 93,91            | 1912,20                              | 5,434883                                        | 95316,43             |

### 3.3.2. Altyapı Bağlamında Çevre Etkinliği-Model 2

Karayolu taşımacılığı çevresel etkinliğini altyapı kapsamında ele almak üzere oluşturulan ikinci Model’de Karar Verme Birimlerinin sayısı 22 olarak belirlenmiştir. Grup 1’de Danimarka ve Grup 2’de Letonya ülkeleri yer almamaktadır. Model 1’in yapısı kullanılan girdi ve çıktı değişkenleri Tablo 9’de gösterilmiştir. Model, 3 girdi değişkeni ve 1 istenen, 1 istenmeyen toplam 2 çıktı değişkeninden oluşmaktadır.

**Tablo 9.** Model 2 değişken yapısı

| MODEL 2         |                   |                              |
|-----------------|-------------------|------------------------------|
| <b>Girdiler</b> |                   | Hat Uzunluğu (LTN)           |
|                 |                   | Brüt Sermaye Oluşumu (GFCF)  |
|                 |                   | Toplam Enerji Tüketimi (FEC) |
| <b>Çıktılar</b> | <b>İstenen</b>    | Yük Taşımacılığı Hacmi (FTV) |
|                 | <b>İstenmeyen</b> | Sera Gazı Emisyonları (GHG)  |

Model 1 için etkinlik analizinde kullanılan değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri Grup 1 (Danimarka hariç) için Tablo 10’de Grup 2 (Letonya hariç) için ise Tablo 11’de sunulmuştur.

**Tablo 10.** Tanımlayıcı İstatistikler (Model 2\_Grup 1)

| Değişkenler    | LTN<br>(Km) | GFCF<br>(Milyon<br>Avro) | FEC<br>(Bin Ton<br>Petrol<br>Eşdeğeri ) | GHG<br>(Milyon Ton<br>CO <sub>2</sub><br>Eşdeğeri) | FTV<br>(Milyon Ton-<br>Kilometre) |
|----------------|-------------|--------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Maksimum       | 1118498     | 87831                    | 49196,83                                | 146,0795                                           | 377873                            |
| Minimum        | 86388       | 6317,7                   | 4116,602                                | 11,79763                                           | 12591                             |
| Ortalama       | 272583,8    | 24838,95                 | 20943,97                                | 59,42739                                           | 134775,1                          |
| Standart Sapma | 281935,3    | 23113,29                 | 16117,13                                | 47,19809                                           | 119053,1                          |

**Tablo 11.** Tanımlayıcı İstatistikler (Model 2\_Grup 2)

| Değişkenler    | LTN<br>(Km) | GFCF<br>(Milyon<br>Avro) | FEC<br>(Bin Ton<br>Petrol<br>Eşdeğeri ) | GHG<br>(Milyon Ton<br>CO <sub>2</sub><br>Eşdeğeri) | FTV<br>(Milyon Ton-<br>Kilometre) |
|----------------|-------------|--------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Maksimum       | 220577      | 8376,1                   | 7027,815                                | 19,89658                                           | 64806                             |
| Minimum        | 2912        | 859,3                    | 845,792                                 | 2,64795                                            | 4194                              |
| Ortalama       | 61820,36    | 2974,882                 | 3353,094                                | 9,567958                                           | 29437,91                          |
| Standart Sapma | 57191,42    | 2012,534                 | 1880,414                                | 5,364078                                           | 18706,32                          |

### 3.3.3. İnovasyon Bağlamında Çevre Etkinliği-Model 3

Çevresel inovasyon etkinliği ölçmek amacıyla oluşturulan Model 3 kapsamında KVB olarak Tablo 4’te sunulan Grup 1 ve Grup 2 şeklinde ayrılmış olan toplam 24 Avrupa Birliği ülkesi belirlenmiştir. Modelin girdi ve çıktı değişken yapısı Tablo 12’de gösterilmiştir. Üçüncü modelde iki girdi, bir istenen çıktı ve iki istenmeyen çıktı olmak üzere toplam beş değişken belirlenmiştir.



**Tablo 12.** Model 3 değişken yapısı

| <b>MODEL 3</b>  |                   |                              |
|-----------------|-------------------|------------------------------|
| <b>Girdiler</b> |                   | Toplam Araç Sayısı (TAS)     |
|                 |                   | İnovasyon Endeksi (II)       |
| <b>Çıktılar</b> | <b>İstenen</b>    | Yük Taşımacılığı Hacmi (FTV) |
|                 | <b>İstenmeyen</b> | Trafik Kazaları (TA)         |
|                 |                   | Sera Gazı Emisyonları (GHG)  |

Çevresel inovasyon etkinlik analizinde kullanılan girdi ve çıktı değişkenlerinin tanımlayıcı istatistikleri Grup 1 için Tablo 13’te Grup 2 için ise Tablo 14’te sunulmuştur.

**Tablo 13.** Tanımlayıcı İstatistikler (Model 3 \_Grup 1)

| Değişkenler    | TAS<br>(Adet) | II       | TA<br>(Adet) | GHG<br>(Milyon Ton<br>CO <sub>2</sub><br>Eşdeğeri) | FTV<br>(Milyon Ton-<br>Kilometre) |
|----------------|---------------|----------|--------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Maksimum       | 58494672      | 0,75     | 292202       | 146,0795                                           | 377873                            |
| Minimum        | 2938862       | 0,2      | 2451         | 11,79763                                           | 12591                             |
| Ortalama       | 22612865      | 0,570833 | 64888        | 55,46246                                           | 124911                            |
| Standart Sapma | 20247757      | 0,15724  | 81786,05     | 47,06325                                           | 118586,7                          |

**Tablo 14.** Tanımlayıcı İstatistikler (Model 3 \_Grup 2)

| Değişkenler    | TAS<br>(Adet) | II       | TA<br>(Adet) | GHG<br>(Milyon Ton<br>CO <sub>2</sub><br>Eşdeğeri) | FTV<br>(Milyon Ton-<br>Kilometre) |
|----------------|---------------|----------|--------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Maksimum       | 8202528       | 0,71     | 36629        | 19,89658                                           | 64806                             |
| Minimum        | 542058        | 0,24     | 1104         | 2,64795                                            | 4194                              |
| Ortalama       | 3452511       | 0,455833 | 9374,25      | 9,031777                                           | 28085                             |
| Standart Sapma | 2540050       | 0,131622 | 9947,296     | 5,434883                                           | 18463,47                          |

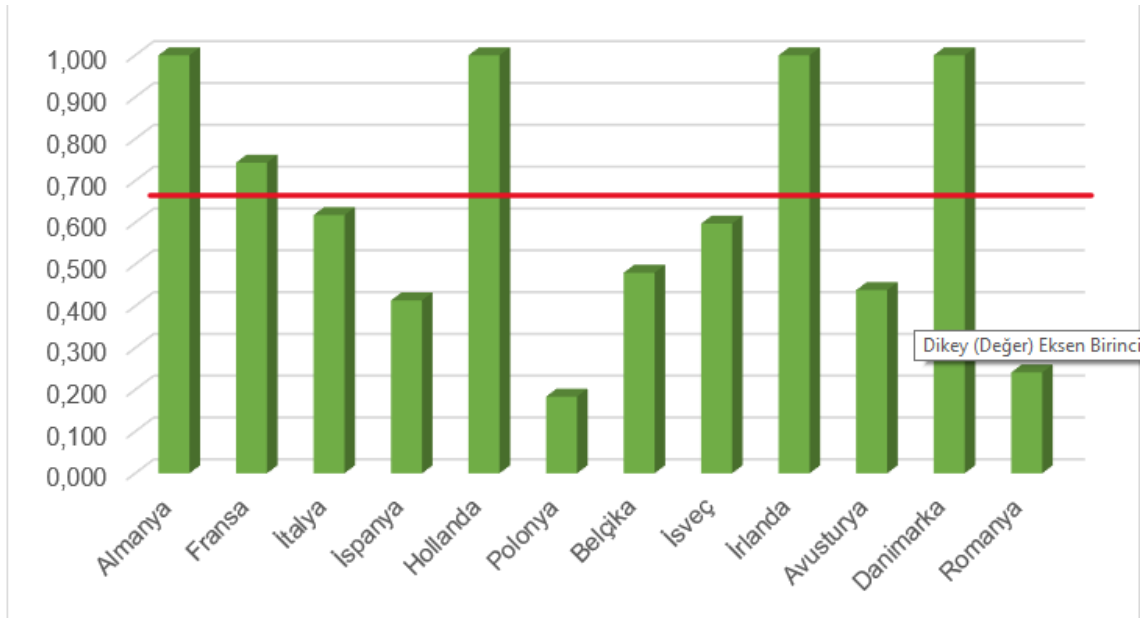
### 3.4. Analiz ve Bulgular

Analiz sonucu elde edilen bilgi ve bulgular her bir model kapsamında alt başlıklar halinde ayrıca sunulmuştur.

### 3.4.1. Analiz ve Bulgular\_ Model 1

İş gücü ve enerji tüketimi değişkenlerinin girdi, GDP (istenen) ve GHG (istenmeyen) değişkenlerinin çıktı olarak kullanıldığı ve 24 AB ülkesinin 2 grup halinde karayolu taşımacılığı sektöründe çevresel etkinliğin analiz edildiği Model 1 kapsamında elde edilen etkinlik skorları Grup 1 için Şekil 6’da, Grup 2 için Şekil 7 ‘de gösterilmiştir. Bu model, ulaştırma sektörünün sürdürülebilirliğini “çevresel etkinlik” bağlamında değerlendirmektedir.

Sadece yüksek GDP üretmek değil, aynı zamanda bunu düşük sera gazı emisyonlarıyla gerçekleştirmek başarının temel ölçüsüdür.



**Şekil 6.** Gelişmiş AB Ülkelerinin (Grup 1) 2023 Yılı İçin Hesaplanan Ekonomi Temelli Model Çevresel Etkinlik Skorları

Bu model kapsamında gelişmiş AB ülkelerinin yaklaşık %36’lık bir iyileştirme potansiyeli olduğunu gösterir. Ülkeler kaynaklarını daha verimli kullanarak hem ekonomik çıktıları artırabilir hem de çevresel zararlarını azaltabilir.

- Etkin Ülkeler (Skor = 1.000): Almanya, Hollanda, İrlanda, Danimarka

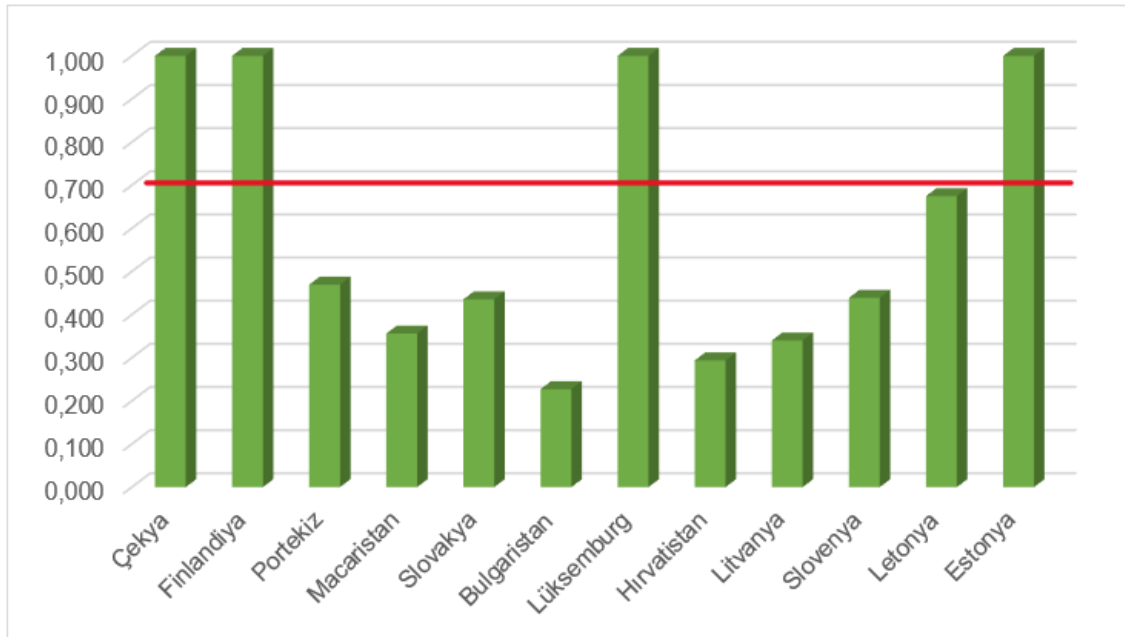
Bu ülkeler, aynı iş gücü ve enerji girdileriyle daha fazla ekonomik çıktı üretirken sera gazı emisyonlarını görece düşük seviyede tutabilmişlerdir. Bu ülkeler diğerlerine kıyasla çevresel verimlilik ve enerji/çalışan başına ekonomik çıktı açısından örnek gösterilebilir.

- Kısmen Etkin Ülkeler (0.5 – 0.8 arası): Fransa, İtalya ve İsveç

Bu ülkeler, potansiyel verimlilik seviyesine yaklaşmış olsa da hâlâ hem enerji hem de iş gücü kullanımında bazı israf ya da düşük verimlilik unsurları bulunmaktadır.

- Düşük Etkinlikteki Ülkeler (Skor < 0.5): İspanya, Avusturya, Belçika, Romanya ve Polonya

Bu ülkeler, kullandıkları iş gücü ve enerji miktarına oranla yeterince yüksek ekonomik çıktı üretememekte veya GHG emisyonları çok yüksek kalmaktadır. Özellikle Polonya ve Romanya, enerji yoğunluklu yapıları ve düşük verimlilikleri nedeniyle dikkat çekmektedir.



**Şekil 7.** Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin (Grup 2) 2023 Yılı İçin Hesaplanan Ekonomi Temelli Model Çevresel Etkinlik Skorları

Orta ve Doğu Avrupa ülkeleri ağırlıklı grubu içeren Grup 2'nin ortalama etkinlik skoru 0.603, önceki gruba kıyasla biraz daha düşüktür (Grup 1: 0.643). Bu durum, bu

grup ülkelerinde emek ve enerji kaynaklarının ekonomik çıktıya dönüştürülmesinde daha fazla verimsizlik yaşandığını göstermektedir.

- Tam Etkin Ülkeler (Skor = 1.000): Çekya, Finlandiya, Lüksemburg, Estonya

Bu dört ülke, girdi kaynaklarını (özellikle iş gücü ve enerji) yüksek verimlilikle kullanmış, hem yüksek GDP üretmiş hem de GHG emisyonlarını görece olarak düşük tutmuştur. Özellikle Estonya ve Çekya, Doğu Avrupa içinde öne çıkan çevresel etkinlik örnekleridir. Finlandiya ise enerji yoğun bir ülke olmasına karşın, karbon emisyonlarını kontrol etme başarısıyla dikkat çekmektedir. Bu ülkeler, diğer ülkeler için referans noktası oluşturmaktadır.

- Kısmen Etkin Ülkeler (0.5–0.8 arası): Letonya (0.675)

Letonya, referans ülkeler düzeyine yaklaşmakla birlikte hâlâ emisyon azaltımı ya da GDP artışı açısından iyileştirme potansiyeline sahiptir. Modelde bu ülkenin yüksek enerji kullanımı veya daha sınırlı ekonomik çıktı üretimi nedeniyle ideal sınırın altında kaldığı anlaşılmaktadır.

- Düşük Etkinlikteki Ülkeler (Skor < 0.5): Portekiz (0.470), Macaristan (0.356), Slovakya (0.435), Bulgaristan (0.227), Hırvatistan (0.294), Litvanya (0.340) ve Slovenya (0.439)

Bu ülkeler genel olarak yüksek enerji ve iş gücü kullanmalarına rağmen, bu kaynakları yeterli düzeyde ekonomik çıktı üretiminde kullanamamakta ya da yüksek GHG emisyonu üretmektedir. Özellikle Bulgaristan ve Hırvatistan, düşük skorlarıyla grubun çevresel ve ekonomik olarak en verimsiz ülkeleri konumundadır.

Gelişmekte olan ülkelerin (Grup 2) ortalama olarak %60 düzeyinde teknik etkinliğe sahip olduğunu; diğer bir ifadeyle %40'a yakın bir verimsizlik potansiyeli bulunduğu görülmektedir.

Model 1 bulguları, ekonomik gelişmişlik ile çevresel etkinlik arasında doğrudan bir ilişki olduğunu açıkça göstermektedir. Gelişmiş AB ülkeleri, yüksek GSYİH

düzeyleriyle birlikte daha sürdürülebilir enerji kullanımı politikalarını benimseyerek, ulaşım kaynaklı emisyonları sınırlı tutmayı başarmaktadır. Buna karşılık, bazı gelişmekte olan ülkelerin de beklenenin üzerinde etkinlik skorlarına ulaşması, çevreye duyarlı büyüme politikalarının uygulanabilirliğini ve başarısını göstermektedir.

Model 1 için elde edilen sonuçlar literatür ile büyük oranda benzerlik göstermiştir:

- Chien ve Hu (2007), OECD ülkeleri kapsamında yaptıkları analiz sonucunda Danimarka, İrlandave Lüksemburg’u etkin ülkeler olarak belirlemiştir.
- Ceylan ve Gunay (2010), Danimarka, Almanya, İrlanda ve Lüksemburg’un etkinlik skorlarını 1; Hollanda (0,953) ve Çekya’nın (0,934) skorlarını 1’e yakın değerde tespit etmişlerdir.
- Şimşek (2014), 1995-2009 dönemine ait çalışmasında Portekiz, Polonya ve İspanya’nın etkinlik puanlarının çoğunlukla 0,50’nin altında olduğunu saptamıştır.
- Rashidi ve Saen (2015), Finlandiya ve İrlanda’nın etkin olduğu sonucuna ulaşmışlardır.
- Geng ve diğerleri (2021), Avrupa'daki gelişmiş ülkelerin performansın genellikle küresel ortalamanın üzerinde olduğunu tespit etmişlerdir.
- Zhu ve diğerleri (2022), çalışmalarında Hollanda, Danimarka, Almanya ve Finlandiya’yı etkin bulmuşlardır.

Ekonomik büyümenin çevresel zararlardan bağımsız olarak sürdürülebilmesinin koşulu, “yeşil büyüme” politikalarının benimsenmesiyle mümkündür. Bu bağlamda çalışma, çevresel maliyetlerin göz ardı edilmeden ekonomik hedeflerin başarılabileceğini ortaya koymaktadır. Modelin bir diğer önemli katkısı ise, ekonomik büyümenin ulaşım sektörü üzerinden çevresel etki üretme potansiyelini veriye dayalı olarak doğrulamasıdır.

Ekonomik bağlamda yapılan analiz sonucu elde edilen etkinlik skorları çerçevesinde etkin olmayan ülkelerin etkin olabilmeleri için Model değişkenleri

açısından yapılabilecek iyileştirmeler yüzdesel olarak Grup 1 için Tablo 15’te, Grup 2 için Tablo 16’da sunulmuştur.

**Tablo 15.** Gelişmiş AB Ülkeleri İçin İyileştirme Önerileri (Model 1\_Grup 1)

| Değişken  | (I)LF           | (I)FEC          | (O)GHG          | (O)GDP          |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| KVB       | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) |
| Belçika   | -39,20%         | -44,24%         | -42,95%         | -               |
| Danimarka | -               | -               | -               | -               |
| Almanya   | -               | -               | -               | -               |
| İrlanda   | -               | -               | -               | -               |
| İspanya   | -42,70%         | -53,48%         | -50,92%         | -               |
| Fransa    | -5,76%          | -27,78%         | -24,00%         | -               |
| İtalya    | -14,91%         | -37,90%         | -38,24%         | -               |
| Hollanda  | -               | -               | -               | -               |
| Avusturya | -46,90%         | -44,28%         | -40,54%         | 7,76%           |
| Polonya   | -77,02%         | -72,80%         | -73,39%         | -               |
| Romanya   | -80,15%         | -46,53%         | -46,68%         | 57,21%          |
| İsveç     | -41,94%         | -31,98%         | -11,09%         | -               |
| Ortalama  | -29,05%         | -29,92%         | -27,32%         | 5,41%           |

**Tablo 16.** Gelişmekte Olan AB Ülkeleri İçin İyileştirme Önerileri (Model 1\_Grup 2)

| Değişken    | (I)LF           | (I)FEC          | (O)GHG          | (O)GDP          |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| KVB         | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) |
| Bulgaristan | -89,21%         | -52,61%         | -56,21%         | -               |
| Çekya       | -               | -               | -               | -               |
| Estonya     | -               | -               | -               | -               |
| Hırvatistan | -87,14%         | -39,33%         | -46,40%         | 3,75%           |
| Letonya     | -45,24%         | 0,00%           | -3,54%          | 25,78%          |
| Litvanya    | -87,56%         | -29,58%         | -33,88%         | 9,75%           |
| Lüksemburg  | -               | -               | -               | -               |
| Macaristan  | -70,47%         | -41,41%         | -47,44%         | -               |
| Portekiz    | -43,28%         | -39,79%         | -48,99%         | -               |
| Slovenya    | -72,19%         | -17,69%         | -24,23%         | 26,65%          |
| Slovakya    | -75,81%         | -23,19%         | -31,93%         | -               |
| Finlandiya  | -               | -               | -               | -               |
| Ortalama    | -47,58%         | -20,30%         | -24,39%         | 5,49%           |

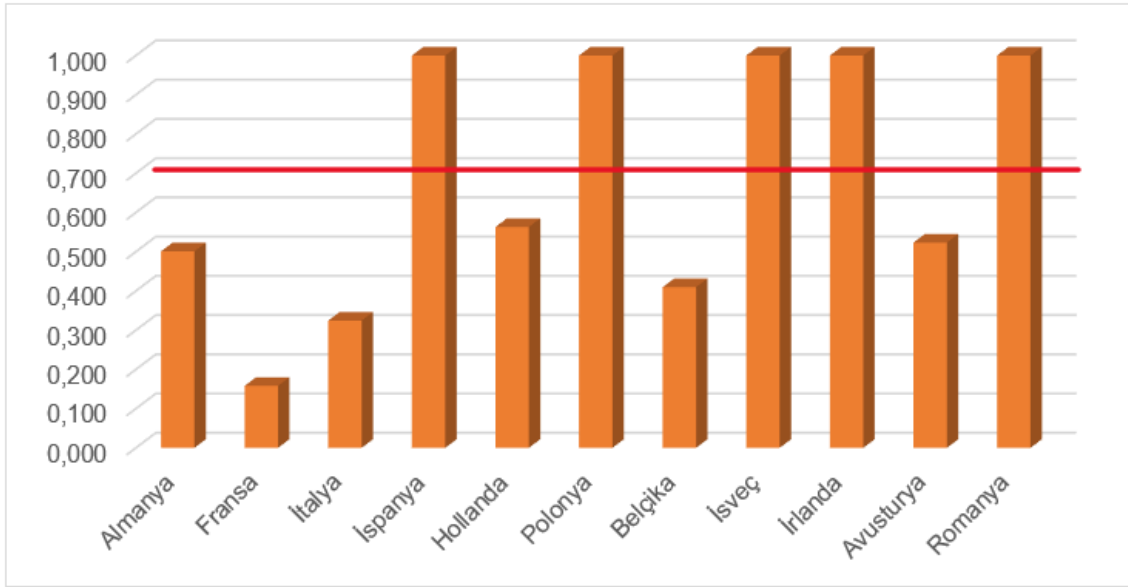
Analiz sonucu elde edilen bulgulara göre; her iki grupta etkinlik skoru endüşük iki ülke için Model değişkenlerini aşağıda belirtilen değerlerde tutmaları halinde ekonomik açıdan çevresel etkin konuma gelebilecekleri değerlendirilmektedir:

- Polonya, GDP düzeyinde herhangi bir değişiklik yapmaksızın, karayolu taşımacılığı çalışan sayısını 260.000, enerji tüketimini 6.451 ktoe ve sera gazı emisyonlarını 18,2 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri.
- Romanya, GDP tutarını 509.947, karayolu taşımacılığı çalışan sayısını 113.000, enerji tüketimini 4.117 ktoe ve sera gazı emisyonlarını 12 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri.
- Hırvatistan, GDP tutarını 80.992 milyon avro, karayolu taşımacılığı çalışan sayısını 13.000, enerji tüketimini 1.510 ktoe ve sera gazı emisyonlarını 4,06 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri.
- Bulgaristan, GDP düzeyinde herhangi bir değişiklik yapmaksızın, karayolu taşımacılığı çalışan sayısını 21.733, enerji tüketimini 1.672 ktoe ve sera gazı emisyonlarını 4,45 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri.

### 3.4.2. Analiz ve Bulgular\_ Model 2

Model 2, ulaştırma altyapısına yönelik fiziksel ve mali kaynakların (hat uzunluğu, yatırım ve enerji) ne ölçüde verimli kullanıldığını, bu girdilerle yük taşımacılığı performansının ne seviyede ve emisyon etkisinin ne kadar kontrol altında tutulduğunu analiz etmektedir.

Karayolu hat uzunluğu, altyapı yatırımı ve enerji tüketimi değişkenlerinin girdi, yük taşımacılığı hacmi (istenen) ve sera gazı emisyonları (istenmeyen) değişkenlerinin çıktı olarak kullanıldığı ve 22 AB ülkesinin 2 grup halinde karayolu taşımacılığı sektöründe çevresel etkinliğin analiz edildiği Model 2 kapsamında elde edilen etkinlik skorları Grup 1 için Şekil 8’de, Grup 2 için Şekil 9 ‘de gösterilmiştir.



**Şekil 8.** Gelişmiş AB Ülkelerinin (Grup 1) 2023 Yılı İçin Hesaplanan Altyapı Temelli Model Çevresel Etkinlik Skorları

- Tam Etkin Ülkeler (Skor = 1.000): İspanya, Polonya, İsveç, İrlanda, Romanya

Bu ülkeler, ulaştırma altyapısı, yatırım harcamaları ve enerji tüketimi gibi girdilerle maksimum yük taşımacılığı hacmine ulaşırken, aynı zamanda sera gazı emisyonlarını etkin biçimde yönetebilmişlerdir.

- Kısmen Etkin Ülkeler (Skor 0.4–0.6): Hollanda (0.563), Avusturya (0.523), Belçika (0.410)

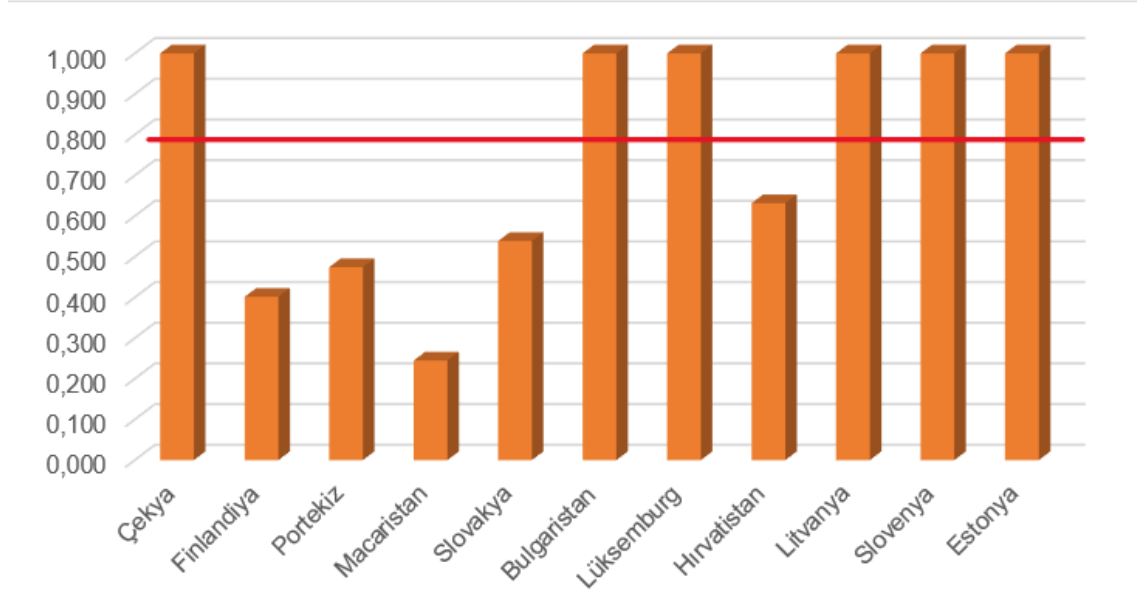
Bu ülkeler etkinliğe yaklaşıp da hâlâ yük taşımacılığı potansiyelini tam kullanamamakta ya da emisyonları yeterince minimize edememektedir. Özellikle yüksek altyapı harcamalarına rağmen, çıktıların orantılı artmaması dikkat çekici olabilir.

- Düşük Etkinlikteki Ülkeler (Skor < 0.4): Almanya (0.501), İtalya (0.324), Fransa (0.158)

Fransa'nın Model 2'deki düşük skoru, yük taşımacılığı kapasitesinin yeterince değerlendirilemediğini veya GHG emisyonlarının yüksek olduğunu göstermektedir.



İtalya ve Almanya, güçlü altyapıya sahip olmalarına rağmen etkinliğin düşük çıkması, bu kaynakların potansiyel çıktılarına dönüştürülmesinde sistematik verimsizlikler yaşandığını düşündürmektedir.



**Şekil 9.** Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin (Grup 2) 2023 Yılı İçin Hesaplanan Altyapı Temelli Model Çevresel Etkinlik Skorları

Ortalama etkinlik skoru, ikinci grup ülkelerinin altyapı kullanımında ilk gruba kıyasla daha verimli olduğunu göstermektedir. (Birinci grup ortalama skoru: 0.680) Bu sonuç, bazı Orta ve Doğu Avrupa ülkelerinin sınırlı kaynaklara rağmen yük taşımacılığında etkin sonuçlar üretebildiğini, aynı zamanda emisyonları kontrol altında tutabildiğini göstermektedir.

Tam Etkin Ülkeler (Skor = 1.000): Çekya, Bulgaristan, Lüksemburg, Litvanya, Slovenya ve Estonya

Bu ülkeler, girdiler (altyapı uzunluğu, yatırım ve enerji tüketimi) ile yüksek taşıma çıktısı üretmiş, aynı zamanda GHG emisyonlarını sınırlandırabilmiştir.

- Kısmen Etkin Ülkeler (Skor 0.4–0.7 arası): Finlandiya (0.402), Portekiz (0.474), Slovakya (0.539) ve Hırvatistan (0.632)

Bu ülkeler, kısmen verimli sayılabilecek durumdadır. Ancak ya GHG emisyonları görece yüksektir, ya da yük taşımacılığı performansı altyapı kapasitesine oranla düşüktür.

- Düşük Etkinlikteki Ülkeler (Skor < 0.4): Macaristan (0.245)

Macaristan, bu modeldeki en düşük skoru almıştır. Bu durum, altyapı yatırımlarının etkin kullanılmadığını ya da emisyon yönetiminin zayıf olduğunu işaret eder. Hem taşımacılık çıktıları hem de çevresel sürdürülebilirlik bakımından iyileştirme gerekmektedir.

Karayolu Hat Uzunluğu, Altyapı Yatırımı ve Toplam Enerji Tüketimi girdileri ile Yük Taşımacılığı Hacmi (istenen) ve Sera Gazı Emisyonu (istenmeyen) çıktıları ile oluşturulan Model 2 kapsamında yapılan analiz sonucu elde edilen bulgular çoğunlukla literatürle uyumlu bulunmuştur.

- Wang ve diğerleri (2022), kara taşımacılığı açısından en yüksek çevresel etkinlik skorlarına sahip ülkeler arasında İspanya, Litvanya, İsveç ve Polonya'nın yer aldığını ortaya koymuştur.
- Domagała ve Kadłubek (2022), Litvanya, Lüksemburg, Polonya, Slovenya ve Bulgaristan'ı mevcut girdileri çıktılarına etkin biçimde dönüştüren ülkeler olarak değerlendirmişlerdir.
- Ghanem ve Alam (2020), etkinlik analizleri sonucunda Estonya, İspanya ve Polonya'yı etkin bulmuşlardır.
- Stefaniec ve diğerleri (2021), 2004-2017 dönemi için yaptıkları çalışmada Bulgaristan, Romanya, Litvanya ve Estonya'yı etkin ülkeler olarak saptamışlardır.
- Mansouri Kaleibar ve Krmar (2024), çalışmalarında İspanya, Polonya, İsveç, İrlanda, romanya, Bulgaristan, Lüksemburg, Litvanya ve Slovenya'yı etkin bulmuşlardır.

Altyapı yatırımlarının, çevresel etkinlik üzerindeki etkilerini inceleyen ikinci model, özellikle akıllı ulaşım sistemleri, raylı sistemlerin entegrasyonu ve çevreci

taşımacılık politikalarının, gelişmiş ülkelerde daha iyi performanslarla sonuçlandığını göstermektedir. Gelişmiş ülkeler, sadece daha fazla altyapı yatırımı yapmakla kalmayıp, bu yatırımları çevresel ve toplumsal sürdürülebilirlik ilkelerine göre planlamaktadır.

Gelişmekte olan ülkelerde ise altyapı yatırımları çoğunlukla niceliksel düzeyde kalmakta; çevresel sürdürülebilirlik boyutu ikinci planda kalabilmektedir. Bu durum, ulaştırma yatırımlarının sadece ekonomik değil, ekolojik boyutlarının da değerlendirilmesi gerektiğini bir kez daha vurgulamaktadır. Ulaşım altyapısının yeşil dönüşümü, düşük karbon salımı yapan sistemlerle desteklenmediği sürece sürdürülebilirlikten uzaklaşılacağı açıktır.

Çevresel etkinliği altyapı temelinde ele alan analiz sonucu elde edilen etkinlik skorları kapsamında etkin olmayan ülkelerin etkin olabilmeleri için Model girdi ve çıktı değişkenleri açısından yapılabilecek iyileştirmeler yüzdesel olarak Grup 1 için Tablo 17’de Grup 2 için Tablo 18’de sunulmuştur.

**Tablo 17.** Gelişmiş AB Ülkeleri İçin İyileştirme Önerileri (Model 2 Grup 1)

| Değişken  | (I)LTN          | (I)GFCF         | (I)FEC          | (O)GHG          | (O)FTV          |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| KVB       | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) |
| Belçika   | -31,68%         | -46,38%         | -3,32%          | -               | 155,85%         |
| Almanya   | -               | -75,88%         | -40,35%         | -44,62%         | -               |
| İrlanda   | -               | -               | -               | -               | -               |
| İspanya   | -               | -               | -               | -               | -               |
| Fransa    | -82,11%         | -83,56%         | -70,45%         | -69,62%         | -               |
| İtalya    | -27,76%         | -73,21%         | -68,21%         | -68,86%         | -               |
| Hollanda  | -39,18%         | -55,37%         | -18,93%         | -16,58%         | 4,28%           |
| Avusturya | -6,85%          | -33,05%         | -0,49%          | -               | 130,76%         |
| Polonya   | -               | -               | -               | -               | -               |
| Romanya   | -               | -               | -               | -               | -               |
| İsveç     | -               | -               | -               | -               | -               |
| Ortalama  | -17,05%         | -33,40%         | -18,34%         | -18,15%         | 26,44%          |

**Tablo 18.** Gelişmekte Olan AB Ülkeleri İçin İyileştirme Önerileri (Model 2\_Grup 2)

| Değişken    | (I)LTN          | (I)GFCF         | (I)FEC          | (O)GHG          | (O)FTV          |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| KVB         | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) | İyileştirme (%) |
| Bulgaristan | -               | -               | -               | -               | -               |
| Çekya       | -               | -               | -               | -               | -               |
| Estonya     | -               | -               | -               | -               | -               |
| Hırvatistan | -               | -               | -6,22%          | -13,09%         | 97,01%          |
| Litvanya    | -               | -               | -               | -               | -               |
| Lüksemburg  | -               | -               | -               | -               | -               |
| Macaristan  | -62,14%         | -54,64%         | -56,54%         | -56,00%         | 89,19%          |
| Portekiz    | -9,13%          | -60,54%         | -50,78%         | -52,41%         | -               |
| Slovenya    | -               | -               | -               | -               | -               |
| Slovakya    | -33,01%         | -40,49%         | -34,11%         | -38,15%         | -               |
| Finlandiya  | -57,57%         | -39,07%         | -53,63%         | -48,59%         | -               |
| Ortalama    | -14,71%         | -17,70%         | -18,30%         | -18,93%         | 16,93%          |

Analiz sonucu elde edilen bulgulara göre; her iki grupta etkinlik skoru endüşük iki ülke için Model değişkenlerini aşağıda belirtilen değerlerde tutmaları halinde altyapısal olarak çevresel etkin konuma gelebilecekleri değerlendirilmektedir:

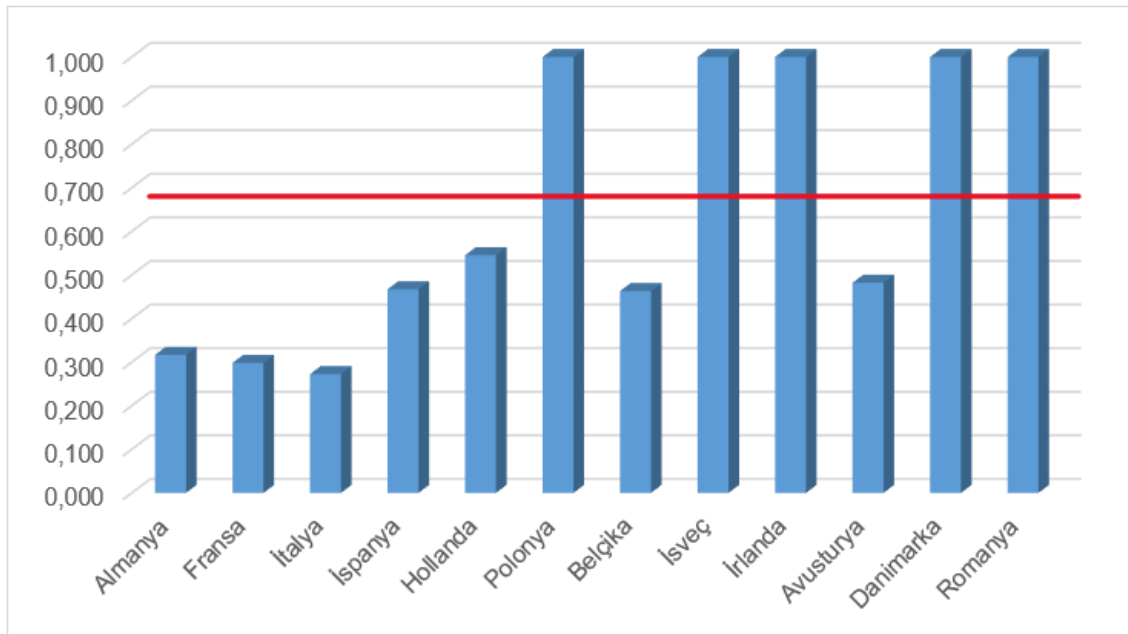
- Fransa, karayolu yük taşımacılığı hacminde herhangi bir değişiklik yapmaksızın, karayolu hat uzunluğunu 200.142 km, alt yapı yatırımlarını 8.115 milyon avro, enerji tüketimini 13.028 ktoe ve sera gazı emisyonlarını 37,5 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri.
- İtalya, karayolu yük taşımacılığı hacminde herhangi bir değişiklik yapmaksızın, karayolu hat uzunluğunu 173.815 km, alt yapı yatırımlarını 7.699 milyon avro, enerji tüketimini 11.794 ktoe ve sera gazı emisyonlarını 33,9 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri.
- Macaristan, karayolu yük taşımacılığı hacmini 63.100 milyon ton-km, karayolu hat uzunluğunu 83.502 km, alt yapı yatırımlarını 1.900 milyon avro, enerji tüketimini 2.144 ktoe ve sera gazı emisyonlarını 6,15 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri.

- Finlandiya, karayolu yük taşımacılığı hacminde herhangi bir değişiklik yapmaksızın, karayolu hat uzunluğunu 33.478 km, alt yapı yatırımlarını 1.983 milyon avro, enerji tüketimini 1.750 ktoe ve sera gazı emisyonlarını 4,85 milyon ton CO2 eşdeğeri.

### 3.4.3. Analiz ve Bulgular\_ Model 3

Bu model, ulaştırma sektöründe araç varlığı ve inovasyon düzeyinin, hem taşımacılık performansına etkisini hem de çevresel ve güvenlik çıktıları üzerindeki etkilerini ölçmektedir.

Karayolu taşımacılığı toplam araç sayısı ve Avrupa İnovasyon Endeksi değişkenlerinin girdi, yük taşımacılığı hacmi (istenen), sera gazı emisyonları (istenmeyen) ve ölümlü veya yaralanmalı trafik kazaları değişkenlerinin çıktı olarak kullanıldığı ve 24 AB ülkesinin 2 grup halinde karayolu taşımacılığı sektöründe çevresel etkinliğin analiz edildiği Model 3 kapsamında elde edilen etkinlik skorları Grup 1 için Şekil 10'da, Grup 2 için Şekil 11 'de gösterilmiştir.



**Şekil 10.** Gelişmiş AB Ülkelerinin (Grup 1) 2023 Yılı İçin Hesaplanan İnovasyon Temelli Model Çevresel Etkinlik Skorları

Grup 1 için ortalama, grubun inovasyon ve araç sayısını verimli kullanarak ulaşım çıktıları üretme düzeyinin yaklaşık %65 olduğunu, %35'lik bir iyileştirme potansiyelinin ise mevcut olduğunu göstermektedir.

- Tam Etkin Ülkeler (Skor = 1.000): Polonya, İsveç, İrlanda, Danimarka, Romanya

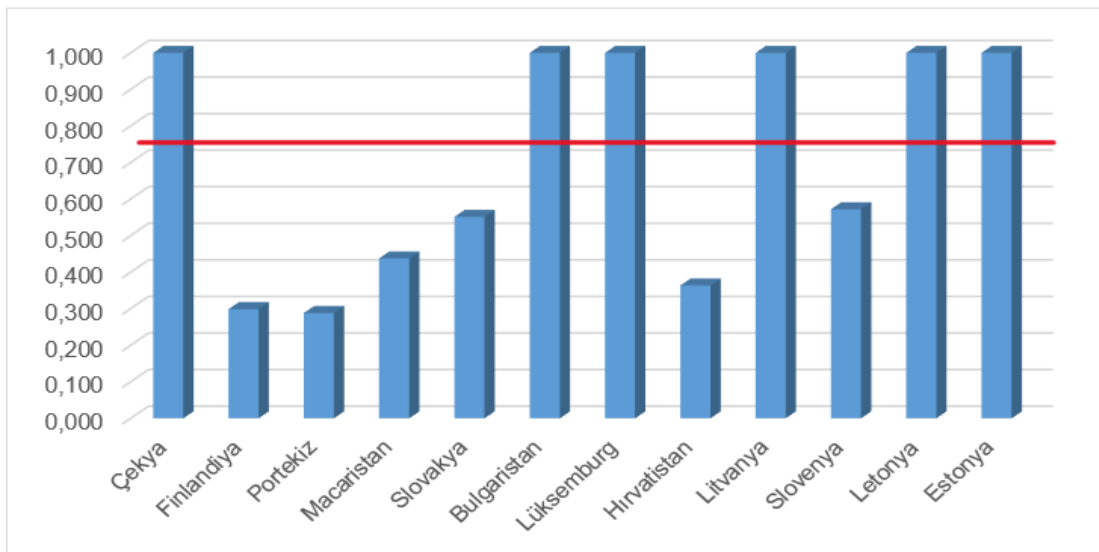
Bu ülkeler, araç stoğu ve inovasyon girdileriyle hem yüksek taşımacılık performansı elde edebilmiş, hem de trafik kazaları ve sera gazı emisyonlarını düşük seviyede tutabilmiştir.

- Kısmen Etkin Ülkeler (Skor 0.4–0.6 arası): İspanya (0.467), Belçika (0.463), Avusturya (0.482), Hollanda (0.545)

Bu ülkeler, taşıma performansını ve çevresel sonuçları kısmen optimize etmiş, ancak daha yüksek araç varlığına ve inovasyon düzeyine rağmen istenmeyen çıktılarda (GHG ve TA) hedeflenen düzeye ulaşamamıştır.

- Düşük Etkinlikteki Ülkeler (Skor < 0.4): Almanya (0.317), Fransa (0.298), İtalya (0.273)

Bu ülkeler, özellikle inovasyon ve araç varlığı açısından güçlü altyapıya sahip olmalarına rağmen, bu kaynakları taşımacılık verimliliğine ve çevresel/güvenlik çıktılarının azaltılmasına yeterince yansıtamamıştır.



**Şekil 11.** Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin (Grup 2) 2023 Yılı İçin Hesaplanan İnovasyon Temelli Model Çevresel Etkinlik Skorları

Grup 2 ülkelerinin ortalama olarak %70,9'luk bir teknik etkinlik düzeyine sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Bu oran, Grup 1'e kıyasla (0.654) daha yüksek bir değerdir. Bu durum, bu ülkelerde inovasyonun taşımacılık performansına daha etkili şekilde entegre edildiğini düşündürmektedir.

Tam Etkin Ülkeler (Skor = 1.000): Çekya, Bulgaristan, Lüksemburg, Litvanya, Letonya, Estonya

Bu ülkeler, hem yük taşımacılığı performansını artırmış, hem de trafik kazalarını ve emisyonları kontrol altında tutabilmişlerdir. Özellikle Çekya ve Baltık ülkeleri (Litvanya, Letonya, Estonya) inovasyon kaynaklarını yüksek etkiyle kullanan ülkeler arasında öne çıkmaktadır.

Bulgaristan, önceki modellere benzer şekilde altyapı ve inovasyon etkinliğinde pozitif ayrılmaktadır.

- Kısmen Etkin Ülkeler (Skor 0.4–0.7): Macaristan (0.438), Slovakya (0.551), Slovenya (0.572)

Bu ülkeler inovasyon kaynaklarını kısmen verimli kullanabilmiştir. Taşımacılık çıktıları artmış olsa da, ya istenmeyen çıktılar yüksek kalmış ya da araç sayısına oranla inovasyon performansı düşüktür.

- Düşük Etkinlikteki Ülkeler (Skor < 0.4): Finlandiya (0.299), Portekiz (0.288), Hırvatistan (0.364)

Bu ülkelerde ciddi verimlilik kayıpları söz konusudur. Özellikle Finlandiya ve Portekiz gibi inovasyon endeksinde yüksek konumda olan ülkelerin düşük skorlar alması, inovatif kapasitenin taşımacılık çıktısına yeterince dönüştürülemediğini göstermektedir.

Girdi değişkenleri Karayolu taşımacılığı toplam araç sayısı ve Avrupa İnovasyon Endeksi; istenen çıktı değişkeni karayolu yük taşımacılığı hacmi, istenmeyen çıktılar trafik kaza sayısı ve sera gazı emisyonları çerçevesinde oluşturulan ve çevresel etkinliği

inovasyon temelinde ele alan analiz sonucunda elde edilen bulgular büyük oranda inovasyon etkinliği çerçevesinde olan literatür ile aynı yöndedir.

- Andrijauskiene ve diğerleri (2023), 2000-2020 yılları arasında Avrupa Birliği ülkelerinin inovasyon etkinliğini değerlendirmişlerdir. Çalışmada Lüksemburg'un inovasyon verimliliği konusunda mutlak lider olduğunu öne sürmüşlerdir.
- Juracka ve diğerleri (2024), ülkelerin 2013-2022 yılları arası dönemi kapsayan, eko-inovasyon etkinliklerini analiz etmişlerdir. Avrupa ülkeleri düzeyinde yapılan bu çalışma sonucunda, Danimarka, İsveç ve Lüksemburg'un son yıllarda inovasyon alanında lider konumda olduklarını tespit etmişlerdir.

Çalışmanın en özgün katkılarından biri olan Model 3, inovasyon kapasitesinin çevresel etkinliği üzerindeki etkisini ölçmüştür. Özellikle gelişmiş ülkelerde inovatif yaklaşımlar sayesinde ulaşımda temiz enerji teknolojilerine geçiş hızlanmakta, karbon emisyonları önemli ölçüde azalmaktadır.

İnovasyonun yalnızca teknolojik bir araç değil, aynı zamanda stratejik bir politika aracı olarak değerlendirilmesi gerektiği bu çalışmanın temel çıkarımlarındandır. Gelişmekte olan ülkeler, yalnızca teknoloji transferi ile değil, kendi yenilikçi ekosistemlerini geliştirerek çevresel etkinliklerini artırabilirler. Bu kapsamda inovasyon politikalarının hem merkezi hükümetler hem de yerel yönetimler düzeyinde desteklenmesi kaçınılmazdır.

Çevresel etkinliği altyapı temelinde ele alan analiz sonucu elde edilen etkinlik skorları kapsamında etkin olmayan ülkelerin etkin olabilmeleri için girdi ve çıktı değişkenlerinin alması gereken değerler Grup 1 için Tablo 19'da, Grup 2 için Tablo 20'de gösterilmiştir.



**Tablo 19.** Gelişmiş AB Ülkeleri İçin İdeal Değişken Değerleri (Model 3 Grup 1)

| Değişken  | (I)TAS        | (I)II | (O)TA        | (O)GHG                                               | (O)FTV                              |
|-----------|---------------|-------|--------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| KVB       | İdeal (Adet)  | İdeal | İdeal (Adet) | İdeal<br>(Milyon Ton<br>CO <sub>2</sub><br>Eşdeğeri) | İdeal<br>(Milyon Ton-<br>Kilometre) |
| Belçika   | 7.703.666,00  | 0,56  | 8.527,68     | 22,38                                                | 80.938,61                           |
| Danimarka | 3.409.991,00  | 0,75  | 2.451,00     | 11,85                                                | 16.406,00                           |
| Almanya   | 22.925.963,72 | 0,31  | 23.483,52    | 54,82                                                | 286.408,00                          |
| İrlanda   | 2.938.862,00  | 0,61  | 5.618,00     | 11,80                                                | 12.591,00                           |
| İspanya   | 21.546.815,82 | 0,30  | 24.066,27    | 51,42                                                | 263.382,00                          |
| Fransa    | 15.908.157,68 | 0,25  | 26.448,85    | 37,50                                                | 169.240,00                          |
| İtalya    | 14.466.658,83 | 0,24  | 27.057,95    | 33,94                                                | 145.173,00                          |
| Hollanda  | 9.569.954,81  | 0,54  | 9.667,37     | 26,52                                                | 107.709,04                          |
| Avusturya | 6.510.603,00  | 0,57  | 7.799,12     | 19,73                                                | 63.825,08                           |
| Polonya   | 28.404.340,00 | 0,35  | 21.169,00    | 68,35                                                | 377.873,00                          |
| Romanya   | 9.679.649,00  | 0,20  | 29.081,00    | 22,12                                                | 65.249,00                           |
| İsveç     | 6.023.872,00  | 0,73  | 11.782,00    | 14,20                                                | 42.383,00                           |
| Ortalama  | 12.424.044,49 | 0,45  | 16.429,31    | 31,22                                                | 135.931,48                          |

**Tablo 20.** Gelişmekte Olan AB Ülkeleri İdeal Değişken Değerleri (Model 3 Grup 2)

| Değişken    | (I)TAS       | (I)II | (O)TA        | (O)GHG                                               | (O)FTV                                 |
|-------------|--------------|-------|--------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| KVB         | İdeal (Adet) | İdeal | İdeal (Adet) | İdeal<br>(Milyon Ton<br>CO <sub>2</sub><br>Eşdeğeri) | İdeal<br>(Milyon<br>Ton-<br>Kilometre) |
| Bulgaristan | 3.703.478,00 | 0,24  | 7.026,00     | 10,16                                                | 33.125,00                              |
| Çekya       | 8.149.957,00 | 0,48  | 20.863,00    | 19,90                                                | 64.806,00                              |
| Estonya     | 1.064.656,00 | 0,59  | 1.703,00     | 2,65                                                 | 4.194,00                               |
| Hırvatistan | 1.594.715,67 | 0,39  | 3.080,02     | 5,07                                                 | 45.281,22                              |
| Letonya     | 931.084,00   | 0,30  | 3.487,00     | 3,13                                                 | 13.203,00                              |
| Litvanya    | 1.963.380,00 | 0,44  | 2.854,00     | 6,15                                                 | 63.101,00                              |
| Lüksemburg  | 542.058,00   | 0,63  | 1.104,00     | 4,06                                                 | 6.964,00                               |
| Macaristan  | 1.520.980,24 | 0,38  | 3.125,24     | 4,86                                                 | 41.717,08                              |
| Portekiz    | 1.963.360,37 | 0,44  | 2.853,97     | 6,15                                                 | 63.100,37                              |
| Slovenya    | 1.477.355,00 | 0,37  | 3.151,99     | 4,73                                                 | 39.608,37                              |
| Slovakya    | 1.299.773,95 | 0,35  | 3.260,88     | 4,21                                                 | 31.024,65                              |
| Finlandiya  | 1.963.360,37 | 0,44  | 2.853,97     | 6,15                                                 | 63.100,37                              |
| Ortalama    | 2.181.179,88 | 0,42  | 4.613,59     | 6,43                                                 | 39.102,09                              |

Analiz sonucu elde edilen bulgulara göre; her iki grupta etkinlik skoru endüşük iki ülke için Model değişkenlerini aşağıda belirtilen değerlerde tutmaları halinde inovasyon bağlamında çevresel etkin konuma gelebilecekleri değerlendirilmektedir:

- İtalya, karayolu yük taşımacılığı hacminde herhangi bir değişiklik yapmaksızın, karayolu toplam araç sayısını 14.466.658, Avrupa İnovasyon Endeksini 0,24, ölümlü veya yaralanmalı toplam kaza sayısını 27.058 ve sera gazı emisyonlarını 33,94 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri.
- Fransa, karayolu yük taşımacılığı hacminde herhangi bir değişiklik yapmaksızın, karayolu toplam araç sayısını 15.908.157, Avrupa İnovasyon Endeksini 0,25, ölümlü veya yaralanmalı toplam kaza sayısını 26.449 ve sera gazı emisyonlarını 37,5 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri.
- Portekiz, karayolu yük taşımacılığı hacmini 63.100 milyon ton-km, karayolu toplam araç sayısını 1.963.360, Avrupa İnovasyon Endeksini 0,44, ölümlü veya yaralanmalı toplam kaza sayısını 26.449 ve sera gazı emisyonlarını 6,14 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri.

#### **3.4.4. Modellerin Karşılaştırılması**

Avrupa Birliği üye ülkeleri (KVB) ulaşıma sektörü (karayolu taşımacılığı modu) çerçevesinde 2023 yılı için; ekonomi, altyapı ve inovasyon boyutlarıyla çevresel etkinliğin Veri Zarflama Analizi (VZA) (istenmeyen çıktıları içeren çıktı yönelimli BCC modeli - Output-oriented BCC model with undesirable outputs (O-BCC-UO)) ile analizi sonucunda elde edilen etkinlik skorları 3 modeli de kapsayacak şekilde Grup 1 için Tablo 21’de Grup 2 için Tablo 22’de sunulmuştur.

**Tablo 21.** Gelişmiş AB Ülkelerinin (Grup 1) 2023 Yılı İçin Hesaplanan Etkinlik Skorları

| Gelişmişlik Sıralaması | KVB                     | Model 1 Etkinlik Skoru | Model 2 Etkinlik Skoru | Model 3 Etkinlik Skoru |
|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1                      | Almanya                 | 1,000                  | 0,501                  | 0,317                  |
| 2                      | Fransa                  | 0,743                  | 0,158                  | 0,298                  |
| 3                      | İtalya                  | 0,618                  | 0,324                  | 0,273                  |
| 4                      | İspanya                 | 0,414                  | 1,000                  | 0,467                  |
| 5                      | Hollanda                | 1,000                  | 0,563                  | 0,545                  |
| 6                      | Polonya                 | 0,184                  | 1,000                  | 1,000                  |
| 7                      | Belçika                 | 0,480                  | 0,410                  | 0,463                  |
| 8                      | İsveç                   | 0,597                  | 1,000                  | 1,000                  |
| 9                      | İrlanda                 | 1,000                  | 1,000                  | 1,000                  |
| 10                     | Avusturya               | 0,438                  | 0,523                  | 0,482                  |
| 11                     | Danimarka               | 1,000                  |                        | 1,000                  |
| 12                     | Romanya                 | 0,241                  | 1,000                  | 1,000                  |
|                        | Ortalama Etkinlik Skoru | 0,643                  | 0,680                  | 0,654                  |

Üç ortalama birbirine oldukça yakın olsa da en yüksek ortalama altyapı boyutuna aittir. Bu, birçok ülkenin altyapı kaynaklarını ekonomik ve çevresel çıktı üretiminde görece olarak daha verimli kullandığını göstermektedir.

İrlanda ve Danimarka: Üç modelde de tam etkinlik skoru (1.000) elde etmişlerdir. Bu durum, söz konusu ülkelerin hem ekonomik kaynakları hem altyapıyı hem de inovasyonu çok yönlü ve dengeli biçimde kullandığını, tutarlı yüksek performans sergilediklerini göstermektedir.

Polonya ve Romanya, altyapı ve inovasyonu görece olarak etkin kullanmakta ancak ekonomik çıktı üretme kapasiteleri görece sınırlıdır. Gelişmekte olan ülke yapılarıyla uyumludur.

İspanya'nın altyapı yatırımları ile taşımacılık çıktıları arasında güçlü ilişki kurduğu, fakat bu etkinliğin ekonomiye ve çevresel çıktıların yönetimine aynı ölçüde yansımadağı görülmektedir.

Almanya, Fransa ve İtalya'da yüksek girdi kullanımı (örneğin yatırım ve inovasyon düzeyi) olmasına rağmen, çıktıların (taşımacılık performansı, emisyonlar, kazalar) yeterince iyileştirilmediği anlaşılmaktadır.

**Tablo 22.** Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin (Grup 2) 2023 Yılı İçin Hesaplanan Etkinlik Skorları

| Gelişmişlik Sıralaması | KVB                     | Model 1 Etkinlik Skoru | Model 2 Etkinlik Skoru | Model 3 Etkinlik Skoru |
|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1                      | Çekya                   | 1,000                  | 1,000                  | 1,000                  |
| 2                      | Finlandiya              | 1,000                  | 0,402                  | 0,299                  |
| 3                      | Portekiz                | 0,470                  | 0,474                  | 0,288                  |
| 4                      | Macaristan              | 0,356                  | 0,245                  | 0,438                  |
| 5                      | Slovakya                | 0,435                  | 0,539                  | 0,551                  |
| 6                      | Bulgaristan             | 0,227                  | 1,000                  | 1,000                  |
| 7                      | Lüksemburg              | 1,000                  | 1,000                  | 1,000                  |
| 8                      | Hırvatistan             | 0,294                  | 0,632                  | 0,364                  |
| 9                      | Litvanya                | 0,340                  | 1,000                  | 1,000                  |
| 10                     | Slovenya                | 0,439                  | 1,000                  | 0,572                  |
| 11                     | Letonya                 | 0,675                  |                        | 1,000                  |
| 12                     | Estonya                 | 1,000                  | 1,000                  | 1,000                  |
|                        | Ortalama Etkinlik Skoru | 0,603                  | 0,754                  | 0,709                  |

Altyapı boyutu, ortalama skor açısından en yüksek değere sahiptir. Bu, birçok Grup 2 ülkelerinin yatırımlarıyla taşımacılığı verimli şekilde entegre ettiğini göstermektedir.

Ekonomik çıktı üretimi (Model 1) ise diğer boyutlara göre daha düşük düzeydedir. Bu durum, bu ülkelerin iş gücü ve enerji kaynaklarını görece daha az ekonomik çıktı ile değerlendirdiğini göstermektedir.

Finlandiya, ileri ekonomisi ile yüksek üretim kapasitesi olsa da inovasyon ve altyapı çıktılarında düşük verimlilik sergilemiştir. Finlandiya gibi ülkelerde yüksek inovasyon endeksi mevcut, ancak taşımacılık emniyeti ve çevre performansı ile uyumsuz. Geliştirilen teknolojiler ulaştırma sistemine daha etkin entegre edilmelidir.

Slovenya, Litvanya gibi ülkeler altyapıda başarılı, ancak bu performans ekonomik büyümeye yeterince yansıtılamıyor. Taşımacılığın ekonomik değeri maksimize edilmelidir.

Estonya, Letonya gibi ülkelerin gösterdiği gibi, küçük ölçekli ülkelerde bile inovasyon stratejileri başarılı bir şekilde çevre ve güvenlikle ilişkilendirilebilir.

Macaristan ve Portekiz gibi ülkeler için hem ekonomik çıktı hem altyapı entegrasyonu hem de inovatif performans düşüktür. Bu ülkelerde sektörel dönüşüm stratejileri bütüncül olarak ele alınmalıdır.

İki grup birlikte değerlendirilirse:

Batı/Kuzey Avrupa ülkeleri, ekonomiye dayalı etkinlikte daha başarılıdır.

Doğu Avrupa ülkeleri, sınırlı kaynaklara rağmen altyapı ve inovasyon performanslarını daha iyi taşıma çıktısına dönüştürebilmektedir.

- Model 1 – Çevresel Ekonomik Etkinlik

Grup 1 ülkeleri iş gücü ve enerji ile daha fazla GDP üretmektedir.

Grup 2 ülkelerinde ekonomik çıktı potansiyeli düşük kalmaktadır.

- Model 2 – Çevresel Altyapı Etkinliği

Grup 2'nin altyapı yatırımlarını taşıma hacmine dönüştürme kapasitesi güçlüdür.

Grup 1'de yatırımlar daha büyük ölçekte ama verimlilik görece düşüktür.

- Model 3 – Çevresel İnovasyon Etkinliği

Grup 2'de inovasyon stratejileri genellikle daha doğrudan performansa dönmemektedir (örneğin Estonya, Litvanya, Letonya).

Grup 1'de (örneğin Almanya, Fransa) inovasyon seviyesi yüksek olsa da çıktı verimliliği düşüktür → entegrasyon problemi.

Dengesiz performans gösteren ülkeler:

Polonya'nın durumu, boyut bazlı görece etkinlik farkı olarak değerlendirilebilir.

Bir ülke bir boyutta teknik olarak çok verimli olabilirken, başka bir boyutta ciddi verim

kaybı yaşayabilir. Bu, politika yapıcılar için oldukça kıymetli bir içgörüdür çünkü hangi alanlarda reform gerektiğini açıkça gösterir. Polonya, kömür ekonomisinden dolayı ulaştırma sektöründe enerji yoğunluğu yüksek, bu da GHG emisyonlarını artırıyor olabilir. AB'nin TEN-T ağına entegrasyon, otoyol ve ekspres yollar gibi büyük altyapı programları (65 milyar \$ yatırım) sayesinde yük taşımacılığı hacmini artırmıştır. Orta Avrupa lojistik geçişi, Rail Baltica gibi projelerle entegre edildiğinde yüksek FTV sağlamaktadır.

Almanya, ülkede yoğun karayolu altyapısı ve otoyol sistemi var, ancak yük taşımacılığı birimlerindeki verimlilik bu altyapıyı desteklemede zayıf kalmaktadır. Bakım ve modernizasyon gereksinimi bulunmaktadır (4000 köprü onarım bekliyor). 2022 sonrası doğalgaz şokları ve bütçe baskıları, ulaşımda dijitalizasyon ve altyapı finansmanını kısıtlamaktadır. Almanya Avrupa'nın en büyük otomotiv üreticisidir ve toplam araç stokları bakımından oldukça yoğundur. Bu durum, girdi olarak kullanılan TAS (Toplam Araç Sayısı) değerinin çok yüksek olmasına yol açabilir. Almanya'nın araç üretim kapasitesi büyük olduğu için, hem sanayi kaynaklı hem de taşıt kullanımı kaynaklı GHG emisyonları yüksek seviyelerde seyretmektedir. Almanya'nın otomotiv devi olması, Model 3'te kullanılan araç sayısı, GHG ve trafik kazası gibi değişkenler bakımından dezavantaj yaratmaktadır. Bu durum, üretim büyüklüğünün her zaman verimlilik anlamına gelmediğini; aksine çevresel ve sosyal etkilerle optimize edilmemiş büyük sistemlerin DEA çerçevesinde verimsiz görünebileceğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla Almanya'nın Model 3'teki düşük etkinliği, yüksek araç stoku, yetersiz emisyon azaltımı ve kazaların azaltılmasında istenen seviyeye ulaşamamasıyla ilişkilidir. Bu, politika yapıcılar için araç üretimini sadece ekonomik büyüme değil, sürdürülebilirlik ve güvenlik boyutlarıyla birlikte ele alma gereğini vurgular.

Fransa ulaşım sisteminde demiryolu ve toplu taşıma yatırımları önceliklidir. Karayolu taşımacılığı sınırlı paya sahiptir. Yük taşımacılığında demiryolu ve nehir yolu

tercihleri, karayolu etkinliğini doğrudan etkiler. Bu, özellikle Model 2’de düşük FTV verileriyle kendini gösterir. İnovasyon ile ilgili politikalar mevcut, ancak bu politikaların çevresel çıktılarına dönüşüm etkinliği hâlâ sınırlı kalmış olabilir.

Fransa, ulaştırma ekonomisinde görece verimli bir yapıya sahip olmasına rağmen altyapı ve inovasyon politikalarının karayolu sektörü özelinde etkili olmadığı gözlemlenmektedir.

Portekiz, Macaristan, Belçika ve Avusturya ise genel olarak daha düşük düzeyde ama daha tutarlı bir performans sergilemektedir. Bu da kalkınma düzeyiyle ve taşıma yoğunluğuyla yakından ilgilidir.

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma, Avrupa Birliği ülkelerinde ulaştırma sektörü karayolu taşımacılığı bağlamında çevresel etkinliği çok boyutlu bir yaklaşımla incelemeyi ve bu kapsamda çevre, ekonomi, altyapı ve inovasyon ilişkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ulaştırma sektörü, modern toplumların ekonomik ve sosyal kalkınmalarında temel bir rol oynamaktadır. Ancak bu sektör, aynı zamanda ciddi çevresel dışsallıkları da beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda ulaştırma sistemlerinin yalnızca ekonomik etkinliği değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da değerlendirilmesi gereklidir. Tez kapsamında uygulanan Veri Zarflama Analizi (VZA) (çıktı odaklı BCC modeli - Output-oriented BCC model with undesirable outputs) ile geliştirilen üç farklı model aracılığıyla, çevresel etkinliği; ekonomik göstergeler, altyapı unsurları ve inovasyon 2023 yılı verileri çerçevesinde analiz edilmiştir.

Çalışma, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda ulaştırma politikalarının çevresel etkilerini hem kavramsal hem de ampirik düzlemde ele alarak, çevre odaklı verimlilik analizi bağlamında özgün bir katkı sağlamaktadır. Giderek artan küresel çevre sorunları, ulaşım kaynaklı emisyonlar ve altyapının sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmanın sunduğu çok katmanlı modelleme yaklaşımı, hem bilimsel literatür açısından hem de politika yapıcılar için oldukça değerli öneriler içermektedir.

Çalışmada kullanılan analitik yaklaşım, sadece ekonomi temelinde etkinliği değil aynı zamanda ülkelerin çevresel stratejileri, inovasyon kabiliyetleri ve altyapı yatırımlarıyla olan ilişkilerini de bütünsel bir bakış açısıyla değerlendirmiştir. Karar Verme Birimleri olarak Avrupa Birliği ülkeleri seçilerek, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler şeklinde iki gruba ayrılması sayesinde bölgesel dinamiklerin farklı yönleri göz



önüne alınmıştır. Bulgular, gelişmiş AB ülkelerinin genellikle daha yüksek çevresel etkinlik skorlarına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ancak bu sonuçlar, gelişmekte olan ülkelerin potansiyelini göz ardı etmemeli; aksine bu ülkelerin politika yapıcılarının, model sonuçlarından hareketle iyileştirme stratejileri üretmeleri gerektiğini göstermektedir.

Model 1'in bulgularına göre, ekonomik gelişmişlik seviyesi ile çevresel etkinlik arasında pozitif bir ilişki mevcuttur. Gelişmiş ülkeler, daha yüksek kişi başı GSYİH seviyelerine sahip olmalarına rağmen aynı zamanda enerji tüketiminde daha verimli teknolojilere yatırım yapma kapasitesine de sahiptirler. Bu da onların daha düşük karbon yoğunluğuna ulaşmalarına imkân tanımaktadır. Ancak dikkat çekici bir şekilde, gelişmekte olan bazı ülkelerin daha düşük ekonomik seviyeye rağmen etkinlik açısından yüksek skorlar elde etmesi, bu ülkelerde sürdürülebilir uygulamaların yerleşmeye başladığını göstermektedir. Bu durum, ekonomik büyümenin çevresel etkinlik ile çelişmek zorunda olmadığını; aksine, uygun stratejilerle birlikte her iki hedefin uyumlu hale getirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Model 2 kapsamında, altyapı ile çevresel etkinlik arasındaki ilişki irdelenmiştir. Ulaşımaya yönelik altyapı yatırımları, çoğu zaman ekonomik büyümenin ön koşulu olarak görülmekle birlikte, bu yatırımların planlı ve sürdürülebilir biçimde yapılmaması durumunda çevresel etkinliği olumsuz etkileyebileceği saptanmıştır. Çalışma bulgularına göre, gelişmiş ülkeler daha entegre ulaşım ağları ve akıllı altyapı sistemleri sayesinde, çevresel etkinliği artıran uygulamaları hayata geçirebilmişlerdir. Özellikle raylı sistemler, temiz enerjiye dayalı taşıma altyapısı ve bilgi teknolojilerinin ulaşım sistemlerine entegrasyonu gibi faktörlerin çevresel etkinlik üzerinde belirleyici olduğu görülmüştür.

Model 3, inovasyon boyutunun çevresel etkinlik üzerindeki etkilerini analiz etmiş ve özellikle Ar-Ge harcamalarının, patent sayılarının ve inovasyon kapasitesinin çevresel performans üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. İnovatif uygulamaların

yaygınlaştığı ülkelerde emisyon azaltım teknolojilerinin hızla benimsendiği, elektrikli araç kullanımı ve alternatif enerji kaynaklarının ulaştırma sektörüne entegre edilmesiyle çevresel etkinlik düzeylerinin yükseldiği gözlenmiştir. Bu bağlamda, inovasyon yalnızca teknolojik bir tercih değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği sağlayan temel bir politika aracı olarak öne çıkmaktadır.

Çalışma boyunca yapılan grup bazlı analizler, Avrupa Birliği içindeki gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında çevresel etkinlik farkı olduğunu ortaya koymuştur. Ancak bu fark, gelişmekte olan ülkelerin yapısal olarak dezavantajlı olduğu anlamına gelmemektedir. Aksine, etkinlik skorlarındaki bu farklılıklar, hangi alanlarda iyileştirme yapılması gerektiğine dair somut ipuçları sunmaktadır.

Sonuçlar, gelişmekte olan ülkelerin özellikle altyapı planlamasında entegrasyon eksikliği, inovasyon yatırımlarının yetersizliği ve ekonomik büyümenin çevresel maliyetleriyle uzlaştırılamaması gibi nedenlerle etkinlik düzeylerinin düşük kaldığını göstermektedir. Bu ülkelerin, gelişmiş ülkelerin izlediği stratejik yol haritalarını kendi ulusal koşullarına uyarlayarak benzer başarıyı elde etmesi mümkündür.

Çalışma kapsamında her üç model için yapılan analiz sonucunda elde edilen bulgular benzer alanlarda yapılan literatür ile büyük oranda aynı doğrultudadır. Chien ve Hu (2007), Ceylan ve Gunay (2010), Şimşek (2014), Rashidi ve Saen (2015), Geng ve diğerleri (2021), Zhu ve diğerleri (2022), Wang ve diğerleri (2022), Domagała ve Kadłubek (2022), Ghanem ve Alam (2020), Stefaniec ve diğerleri (2021), Mansouri Kaleibar ve Krmac (2024), Andrijauskiene ve diğerleri (2023) ile Juracka ve diğerleri (2024) nin bulguları ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan analiz sonucunda elde edilen bulgular, çalışmanın yalnızca teorik değil, aynı zamanda pratik sonuçlar da sunduğunu göstermektedir. Bu bulgular ışığında, gelişmiş AB ülkelerinde etkinlik düzeylerinin daha yüksek olduğu, ancak gelişmekte olan

ülkelerin de çeşitli politikalar ve yapısal reformlarla bu seviyelere ulaşabileceği anlaşılmıştır. Bu çerçevede geliştirilen politika önerileri şu başlıklar altında toplanabilir:

**Politika Önerileri:** Gelişmekte olan AB ülkeleri, çevresel etkinliği artırmak adına hem ekonomik hem altyapısal yatırımlarını sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda yeniden şekillendirmelidir. Özellikle düşük karbonlu ulaştırma sistemlerine geçiş, şehir içi taşımacılıkta elektrikli araçların kullanımının teşviki, bisiklet yollarının yaygınlaştırılması ve toplu taşıma sistemlerinin modernizasyonu gibi uygulamalar bu ülkelerde çevresel etkinliği artırabilir.

**İnovasyon ve Ar-Ge:** Model 3'ün bulgularından hareketle, çevresel etkinlik konusunda inovasyonun anahtar rolü olduğu söylenebilir. Bu kapsamda, gelişmekte olan ülkelerin özellikle Ar-Ge harcamalarını artırmaları, üniversite-sanayi iş birliklerini teşvik etmeleri ve yenilikçi enerji teknolojilerine yönelik teşvik mekanizmaları geliştirmeleri gereklidir.

**Teşvik Mekanizmalarının Etkin Kullanımı:** Çevreci yatırımları destekleyen finansal teşvikler, özellikle elektrikli araçlar, akıllı ulaşım sistemleri ve alternatif yakıtların kullanımı gibi alanlarda artırılmalıdır. Gelişmekte olan ülkelerde özel sektörün yatırım yapması için gerekli altyapı güveni ve mali teşvik ortamı oluşturulmalıdır.

**Altyapı Yatırımlarının Planlanması:** Ulaştırma altyapısı yatırımlarının yalnızca miktar değil, nitelik açısından da değerlendirilmesi önemlidir. Akıllı ulaşım sistemleri, dijital trafik yönetimi, entegre lojistik çözümleri gibi teknolojik altyapı yatırımları hem çevresel hem de ekonomik etkinliği eş zamanlı olarak artırabilir.

**Eğitim ve Bilinçlendirme:** Sürdürülebilir ulaşım alışkanlıklarının geliştirilmesinde halkın eğitimi ve bilinçlendirilmesi elzemdir. Bu kapsamda hem bireylerin hem de işletmelerin karbon ayak izlerini azaltacak davranış kalıplarına yönlendirilmesi, çevresel etkinliğin artırılmasında tamamlayıcı bir rol oynar.

Uluslararası İş birliği ve AB Programları: Avrupa Birliği'nin Horizon, LIFE ve TEN-T gibi programları, sürdürülebilir ulaştırma uygulamalarını desteklemektedir. Gelişmekte olan ülkelerin bu programlardan etkin şekilde faydalanmaları hem finansman hem de teknik kapasite geliştirme açısından destekleyici olacaktır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması ulaştırma sektörü çerçevesinde çevresel etkinliğin çok boyutlu doğasına ışık tutmakta ve ekonomik, altyapısal ve yenilikçi etkenlerin çevresel performans üzerindeki etkilerini veri temelli bir yaklaşımla ortaya koymaktadır. Çalışma, yöntemsel olarak üçlü modelleme sistemi ile alan yazına özgün bir katkı sunmuştur. Ayrıca istenmeyen çıktılar (Sera Gazı Emisyonları ve Trafik Kazaları) dikkate alınarak oluşturulan modeller, klasik üretim verimliliği analizlerinden ayrılarak çevresel boyutu merkeze almıştır. Çalışma aynı zamanda; çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda ulaştırma sistemlerinin nasıl dönüştürülebileceği, hangi faktörlerin bu dönüşümü hızlandırdığı ve ülkelerin karşı karşıya kaldığı yapısal farklılıkların nasıl giderilebileceği konusunda bilimsel ve uygulamalı düzeyde kapsamlı bir yol haritası sunmaktadır.

Gelecekteki çalışmalar için, analiz döneminin farklı yılları kapsayacak şekilde uzatılması, Karar verme birimi olarak yalnızca AB değil, OECD veya BRICS ülkelerinin de dâhil edilmesiyle karşılaştırmalı küresel analizler yapılması, etkinlik skorlarına etki eden değişkenlerin panel veri regresyonları ile desteklenmesi, sektörel ayrımında ulaştırmanın diğer alt modlarının (deniz yolu, demiryolu, hava yolu) ayrı ayrı analiz edilmesi önerilmektedir.

## KAYNAKÇA

- Akram, R., Chen, F., Khalid, F., Huang, G., & Irfan, M. (2021). Heterogeneous effects of energy efficiency and renewable energy on economic growth of BRICS countries: a fixed effect panel quantile regression analysis. *Energy*, 215, 119019.
- Ali, Y., Socci, C., Pretaroli, R., & Severini, F. (2018). Economic and environmental impact of transport sector on Europe economy. *Asia-Pacific Journal of Regional Science*, 2, 361-397.
- Algın, D. O., Tezsürücü, D. (2014). Veri zarflama analizi ile görelî etkinliklerin karşılaştırılması: Türkiye’deki illerin kültürel göstergelerine ilişkin bir uygulama. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 21(2), 1-18.
- Altomonte, C., Gamba, S., Mancusi, M. L., & Vezzulli, A. (2016). R&D investments, financing constraints, exporting and productivity. *Economics of Innovation and New Technology*, 25(3), 283-303.
- Andrijauskiene, M., Ioannidis, D., Dumciuviene, D., Dimara, A., Bezas, N., Papaioannou, A., & Krinidis, S. (2023). European Union innovation efficiency assessment based on data envelopment analysis. *Economies*, 11(6), 163.
- Antunes, J., Tan, Y., Wanke, P., & Jabbour, C. J. C. (2023). Impact of R&D and innovation in Chinese road transportation sustainability performance: A novel trigonometric envelopment analysis for ideal solutions (TEA-IS). *Socio-Economic Planning Sciences*, 87, 101544.
- Apergis, N., Aye, G. C., Barros, C. P., Gupta, R., & Wanke, P. (2015). Energy efficiency of selected OECD countries: A slacks based model with undesirable outputs. *Energy Economics*, 51, 45-53.
- Ayllón, S., & Radicic, D. (2019). Product innovation, process innovation and export propensity: Persistence, complementarities and feedback effects in Spanish firms. *Applied Economics*, 51(33), 3650-3664.

- Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management science*, 30(9), 1078-1092.
- Bhat, A., & Ordóñez Garcia, J. (2021). Sustainability and EU road transport carbon emissions from consumption of diesel and gasoline in 2000 and 2018. *Applied Sciences*, 11(16), 7601.
- Bian, Y., Hu, M., Wang, Y., & Xu, H. (2016). Energy efficiency analysis of the economic system in China during 1986–2012: A parallel slacks-based measure approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 990-998.
- Bilbao-Osorio, B., & Rodríguez-Pose, A. (2004). From R&D to innovation and economic growth in the EU. *Growth and Change*, 35(4), 434-455.
- Bottega, A., & Romero, J. P. (2021). Innovation, export performance and trade elasticities across different sectors. *Structural Change and Economic Dynamics*, 58, 174-184.
- Cai, X., Xiang, H., & Zheng, H. (2024). Impact of energy consumption patterns on peak emissions in China's carbon neutralisation process. *Energy Strategy Reviews*, 55, 101501.
- Cassiman, B., & Golovko, E. (2011). Innovation and internationalization through exports. *Journal of international business studies*, 42, 56-75.
- Ceylan, D., & Gunay, E. N. O. (2010, July). Energy efficiency trends and policies: Cross-country comparison in Europe. In *International Conference of Economic Modelling (ECOMOD)*, Istanbul, Turkey. p7-10.
- Chang, K., Wan, Q., Lou, Q., Chen, Y., & Wang, W. (2020). Green fiscal policy and firms' investment efficiency: New insights into firm-level panel data from the renewable energy industry in China. *Renewable Energy*, 151, 589-597.
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444.

- Chen, L., Wu, F. M., Wang, Y. M., & Li, M. J. (2020). Analysis of the environmental efficiency in China based on the DEA cross-efficiency approach under different policy objectives. *Expert Systems*, 37(3), e12461.
- Cheng, L., Liu, J., & Liu, Y. (2008, October). A Non-Parameter Analysis of Energy Use Efficiency in China. In *2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing* (pp. 1-4). IEEE.
- Chien, T., & Hu, J. L. (2007). Renewable energy and macroeconomic efficiency of OECD and non-OECD economies. *Energy Policy*, 35(7), 3606-3615.
- Chung, Y. H., Fare, R., & Grosskopf, S. (1997). Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, 51(3), 229–240.
- Çam, S., & Kağızman, M. A. (2023). Investigating the energy efficiency determinants in EU countries by using multi-criteria decision analysis and the Tobit regression model. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 18(1), 2233968.
- Das, P. (2019). *Econometrics in theory and practice*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9019-8>
- De Borger, B., Kerstens, K., & Costa, A. (2002). Public transit performance: what does one learn from frontier studies?. *Transport reviews*, 22(1), 1-38.
- Deakin, E. (2001). Sustainable development and sustainable transportation: strategies for economic prosperity, environmental quality, and equity. (No. UCTC No. 519).
- Domagała, J., & Kadłubek, M. (2022). Economic, energy and environmental efficiency of road freight transportation sector in the EU. *Energies*, 16(1), 461.
- Ebrahimenjad, A. (2011). A new link between output-oriented BCC model with fuzzy data in the present of undesirable outputs and MOLP. *Fuzzy Information and Engineering*, 3(2), 113-125.

Emrouznejad, A., Brzezicki, L., & Lu, C. (2025). Development and Evolution of Slacks-Based Measure Models in Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Review of the Literature. *Journal of Economic Surveys*.

Estellita Lins, M. P., Angulo-Meza, L., & Moreira da Silva, A. C. (2004). A multi-objective approach to determine alternative targets in data envelopment analysis. *Journal of the Operational Research Society*, 55(10), 1090-1101.

European Commission. (2011). *White Paper: Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource-efficient transport system* (COM(2011)144 final). Publications Office of the European Union.

European Commission. (2024). *European Innovation Scoreboard 2024*. Publications Office of the European Union. <https://www.kowi.de/Portaldata/2/Resources/fp/ec-eis-2024.pdf>

European Environment Agency (EEA). Erişim: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/transport-and-mobility>. Erişim tarihi: 01 Mayıs 2025.

Eurostat. (2025). *Key figures on European Transport – 2024 Edition*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2785/977735>.

Fancello, G., Uccheddu, B., & Fadda, P. (2014). Data Envelopment Analysis (DEA) for urban road system performance assessment. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 111, 780-789.

Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. K., & Pasurka, C. (1989). Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. *The review of economics and statistics*, 90-98.

Färe, R., and S. Grosskopf. (2000). Network DEA. *Socio-Economic Planning Sciences*, 34 (1), 35–49.

Färe, R., Grosskopf, S., & Pasurka Jr, C. A. (2007). Environmental production functions and environmental directional distance functions. *Energy*, 32(7), 1055-1066.



- Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the royal statistical society series a: statistics in society*, 120(3), 253-281.
- Fathi, B., Ashena, M., & Bahari, A. R. (2021). Energy, environmental, and economic efficiency in fossil fuel exporting countries: A modified data envelopment analysis approach. *Sustainable Production and Consumption* 26, 588–596.
- Fathi, A., & Saen, R. F. (2024). Sustainability evaluation of transportation supply chains by common set of weights-network DEA and Shannon's entropy in the presence of zero inputs. *Environment, Development and Sustainability*, 26(3), 7999-8025.
- Georgatzi, V. V., Stamboulis, Y., & Vetsikas, A. (2020). Examining the determinants of CO2 emissions caused by the transport sector: Empirical evidence from 12 European countries. *Economic Analysis and Policy*, 65, 11-20.
- Geng, Z., Song, G., Han, Y., & Chu, C. (2021). Static and dynamic energy structure analysis in the world for resource optimization using total factor productivity method based on slacks-based measure integrating data envelopment analysis. *Energy Conversion and Management*, 228, 113713.
- Ghanem, O., Li, X., & Alam, K. M. (2020). An efficiency analysis of Turkish railways using data envelopment analysis: comparison study. *International Journal of Technology, Policy and Management*, 20(1), 21-34.
- Gökgöz, F. (2009). Veri zarflama analizi ve finans alanına uygulanması. *Ankara Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi*, Yayın, 597.
- Gökgöz, F., & Erkul, E. (2014). Energy efficiency analysis for the European countries. *International Scientific Publications: Economy & Business Journal*, 8, 124-140.
- Gökgöz, F., & Güvercin, M. T. (2018). Energy security and renewable energy efficiency in EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 226-239.

- Gökgöz, F., & Yalçın, E. (2024). Analyzing the Performances and Efficiencies of European Electric Vehicles in the European Union Market Using Decision Analysis Methods. *Transportation Research Record*, 2678(10), 1039-1056.
- Gökgöz, F., & Yalçın, E. (2025). Evaluating the European transportation sector via energy and climate change mitigation perspectives. *Sustainable Futures*, 100652.
- Griliches, Z. (1990). *Patent statistics as economic indicators: A survey part I*. NBER.
- Gruetzmacher, S. B., Vaz, C. B., & Ferreira, Â. P. (2020, November). Performance assessment of the transport sustainability in the european union. In *Ibero-American Congress of Smart Cities* (pp. 106-119). Cham: Springer International Publishing.
- Guanglan, Z., & Zhening, Z. (2024). Evaluation and Influencing Factors of Regional Environmental Efficiency in China Based on Three-Stage DEA Model. *SAGE Open*, 14(4), 21582440241280825.
- Gujarati, D. N. (2009). *Basic econometrics*, New York: McGraw-Hill/Irwin, Fifth Edition.
- Hatami-Marbini, A., Asu, J. O., & Khoshnevis, P. (2024). Environmental performance assessment in the transport sector using nonparametric frontier analysis: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 189, 109968.
- Henriques, C. O., Gouveia, C. M., Tenente, M., & da Silva, P. P. (2022). Employing Value-Based DEA in the eco-efficiency assessment of the electricity sector. *Economic Analysis and Policy*, 73, 826-844.
- Hsiao, C. (1985). Benefits and limitations of panel data. *Econometric reviews*, 4(1), 121-174.
- International Energy Agency (IEA). *Global Energy Review 2025*, March 2025. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b169aa1-bc88-4c96-b828-aaa50406ba80/GlobalEnergyReview2025.pdf>. Erişim Tarihi: 17 Nisan 2025.

- Jain, P., & Goswami, B. (2021). Energy efficiency in South Asia: Trends and determinants. *Energy*, 221, 119762.
- Jarboui, S., Forget, P., Boujelbene, Y., (2012), Public road transport efficiency: a literature review via the classification scheme, *Public Transport*, 4, s.101-128.
- Jia, Y., Wang, C., Ma, J., Tan, Q., Tang, W., & Lv, B. (2023, April). Research on comprehensive evaluation of energy efficiency in the transportation sector under the "dual-carbon" target. In *2023 IEEE International Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT)* (pp. 1229-1234). IEEE.
- Juracka, D., Nagy, M., Zvarikova, K., & Popescu, G. (2024). Eco-Innovation: Analysis of EU Member States Performance in the EU Eco-Innovation Index 2013–2022. *Systems*, 12(11), 452.
- Kadioğlu, M. (2007). İklim değişiklikleri ve etkileri: meteorolojik afetler. *TMMOB Afet Sempozyumu*, 5(7), 47-55.
- Ke, Y., Li, J., & Zhang, W. (2016). Structure identification in panel data analysis.
- Kim, C., & Shin, W. S. (2019). Does information from the higher education and R&D institutes improve the innovation efficiency of logistic firms?. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 35(1), 70-76.
- Kiran, B. (2008). *Kalkınmada öncelikli illerin ekonomik etkinliklerinin veri zarflama analizi yöntemi ile değerlendirilmesi* (Master's thesis, Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Khraiche, M., Kutlu, L., & Mao, X. (2022). Energy efficiencies of European countries. *Applied Economics*, 54(23), 2694-2706.
- Krautzberger, L., & Wetzel, H. (2012). Transport and CO 2: productivity growth and carbon dioxide emissions in the European commercial transport industry. *Environmental and Resource Economics*, 53, 435-454.
- Kuosmanen, T., & Kortelainen, M. (2005). Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis. *Journal of industrial ecology*, 9(4), 59-72.

- Lan, X., Li, Z., & Wang, Z. (2022). An investigation of the innovation efficacy of Chinese photovoltaic enterprises employing three-stage data envelopment analysis (DEA). *Energy Reports*, 8, 456-465.
- Lam, P. L., & Shiu, A. (2001). A data envelopment analysis of the efficiency of China's thermal power generation. *Utilities policy*, 10(2), 75-83.
- Lee, H. Y., & Park, Y. T. (2005). An international comparison of R&D efficiency: DEA approach. *Asian journal of technology innovation*, 13(2), 207-222.
- Li, H., He, H., Shan, J., & Cai, J. (2019). Innovation efficiency of semiconductor industry in China: A new framework based on generalized three-stage DEA analysis. *Socio-economic planning sciences*, 66, 136-148.
- Li, J., Huang, Q., & Li, Y. (2021). Stepwise improvement for environmental performance of transportation industry in China: a DEA approach based on closest targets. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021(1), 6620823.
- Li, Y., Chiu, Y. H., & Lu, L. C. (2019). New energy development and pollution emissions in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(10), 1764.
- Liao, Z., Liang, S., & Wang, X. (2024). Spatio-temporal evolution and driving factors of green innovation efficiency in the Chinese urban tourism industry based on spatial Markov chain. *Scientific Reports*, 14(1), 10671.
- Liu, H. H., Yang, G. L., Liu, X. X., & Song, Y. Y. (2020). R&D performance assessment of industrial enterprises in China: A two-stage DEA approach. *Socio-Economic Planning Sciences*, 71, 100753.
- Liu, J. B., Liu, B. R., & Lee, C. C. (2024). Efficiency evaluation of China's transportation system considering carbon emissions: Evidence from big data analytics methods. *Science of the Total Environment*, 922, 171031.

- Liu, L., Anwar, A., Irmak, E., & Pelit, I. (2022). Asymmetric linkages between public-private partnership, environmental innovation, and transport emissions. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 35(1), 6519-6540.
- Makridou, G., Andriosopoulos, K., Doumpos, M., & Zopounidis, C. (2016). Measuring the efficiency of energy-intensive industries across European countries. *Energy Policy*, 88, 573-583.
- Mansouri Kaleibar, M., & Krmac, E. (2024). A novel data envelopment analysis framework for performance evaluation of European road transport systems. *Promet-Traffic&Transportation*, 36(1), 24-41.
- Mardani, A., Zavadskas, E. K., Streimikiene, D., Jusoh, A., & Khoshnoudi, M. (2017). A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) approach in energy efficiency. *Renewable and sustainable energy reviews*, 70, 1298-1322.
- Markovits-Somogyi, R., & Bokor, Z. (2014). Assessing the logistics efficiency of European countries by using the DEA-PC methodology. *Transport*, 29(2), 137-145.
- Mavi, R. K., Fathi, A., Saen, R. F., & Mavi, N. K. (2019a). Eco-innovation in transportation industry: A double frontier common weights analysis with ideal point method for Malmquist productivity index. *Resources, Conservation and Recycling*, 147, 39-48.
- Mavi, R. K., Saen, R. F., & Goh, M. (2019b). Joint analysis of eco-efficiency and eco-innovation with common weights in two-stage network DEA: A big data approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 144, 553-562.
- Mavi, R. K., & Mavi, N. K. (2021). National eco-innovation analysis with big data: A common-weights model for dynamic DEA. *Technological Forecasting and Social Change*, 162, 120369.

- Moutinho, V., Madaleno, M., & Macedo, P. (2020). The effect of urban air pollutants in Germany: eco-efficiency analysis through fractional regression models applied after DEA and SFA efficiency predictions. *Sustainable Cities and Society*, 59, 102204.
- Narayanan, E., binti Ismail, W. R., & bin Mustafa, Z. (2022). A data-envelopment analysis-based systematic review of the literature on innovation performance. *Heliyon*, 8(12).
- Pacudan, R., & De Guzman, E. (2002). Impact of energy efficiency policy to productive efficiency of electricity distribution industry in the Philippines. *Energy economics*, 24(1), 41-54.
- Panwar, A., Olfati, M., Pant, M., & Snasel, V. (2022). A review on the 40 years of existence of data envelopment analysis models: Historic development and current trends. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(7), 5397-5426.
- Park, Y. S., Lim, S. H., Egilmez, G., & Szmerekovsky, J. (2018). Environmental efficiency assessment of US transport sector: A slack-based data envelopment analysis approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 152-164.
- Ramanathan, R. (2005). An analysis of energy consumption and carbon dioxide emissions in countries of the Middle East and North Africa. *Energy*, 30(15), 2831-2842.
- Rashidi, K., & Saen, R. F. (2015). Measuring eco-efficiency based on green indicators and potentials in energy saving and undesirable output abatement. *Energy Economics*, 50, 18-26.
- Rashidi, K., Shabani, A., & Saen, R. F. (2015). Using data envelopment analysis for estimating energy saving and undesirable output abatement: a case study in the Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD) countries. *Journal of Cleaner Production*, 105, 241-252.

- Robaina-Alves, M., Moutinho, V., & Macedo, P. (2015). A new frontier approach to model the eco-efficiency in European countries. *Journal of Cleaner Production*, 103, 562-573.
- Rokicki, T., Koszela, G., Ochnio, L., Wojtczuk, K., Ratajczak, M., Szczepaniuk, H., ... & Beldycka-Bórawska, A. (2021). Diversity and changes in energy consumption by transport in EU countries. *Energies*, 14(17), 5414.
- Sandu, S., & Ciocanel, B. (2014). Impact of R&D and innovation on high-tech export. *Procedia Economics and finance*, 15, 80-90.
- Saxena, P., & Saxena, R. R. (2010). Measuring efficiencies in Indian public road transit: a data envelopment analysis approach. *Opsearch*, 47, 195-204.
- Scheel, H. (2001). Undesirable outputs in efficiency valuations. *European journal of operational research*, 132(2), 400-410.
- Segarra-Blasco, A., Teruel, M., & Cattaruzzo, S. (2022). Innovation, productivity and learning induced by export across European manufacturing firms. *Economics of Innovation and New Technology*, 31(5), 387-415.
- Seiford, L. M., & Zhu, J. (2002). Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. *European journal of operational research*, 142(1), 16-20.
- Shahghobadi, S. (2020). Utilization of performance indicators in data envelopment analysis to increase the efficiency discrimination of units. *Computers & Industrial Engineering*, 145, 106535.
- Sharma, S., & Thomas, V. (2008). Inter-country R&D efficiency analysis: An application of data envelopment analysis. *Scientometrics*, 76(3), 483-501.
- Shen, Y., Ruan, D., Hermans, E., Brijs, T., Wets, G., & Vanhoof, K. (2011). Sustainable road transport in the European Union: Changes in undesirable impacts. *Transportation research record*, 2242(1), 37-44.

- Shen, T., Chen, H. H., Zhao, D. H., & Qiao, S. (2022). Examining the impact of environment regulatory and resource endowment on technology innovation efficiency: From the microdata of Chinese renewable energy enterprises. *Energy Reports*, 8, 3919-3929.
- Simeonovski, K., Kaftandzieva, T., & Brock, G. (2021). Energy efficiency management across EU countries: A DEA approach. *Energies*, 14(9), 2619.
- Simsek, N. (2014). Energy efficiency with undesirable output at the economy-wide level: cross country comparison in OECD sample. *American Journal of Energy Research*, 2(1), 9-17.
- Song, W., & Zhang, H. (2025). Research on the measurement and influencing factors of carbon emission efficiency in China's transportation sector based on EBM-Tobit model. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1565476.
- Song, X., Hao, Y., & Zhu, X. (2015). Analysis of the environmental efficiency of the Chinese transportation sector using an undesirable output slacks-based measure data envelopment analysis model. *Sustainability*, 7(7), 9187-9206.
- Statistical Pocketbook. (2024). EU Transport in Figures, Mobility and Transport, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2024. Access Link: [https://transport.ec.europa.eu/facts-funding/studies-data/eu-transport-figures-statistical-pocketbook/statistical-pocketbook-2024\\_en](https://transport.ec.europa.eu/facts-funding/studies-data/eu-transport-figures-statistical-pocketbook/statistical-pocketbook-2024_en)
- Stefaniec, A., Hosseini, K., Assani, S., Hosseini, S. M., & Li, Y. (2021). Social sustainability of regional transportation: An assessment framework with application to EU road transport. *Socio-Economic Planning Sciences*, 78, 101088.
- Su, J., & Rogers, M. M. (2012). The role of economic variables and CO2 emissions in examining the efficiency of national transportation systems. *International Journal of Sustainable Transportation*, 6(1), 48-66.



Sun, S., & Huang, C. (2021). Energy structure evaluation and optimization in BRICS: A dynamic analysis based on a slack based measurement DEA with undesirable outputs. *Energy*, 216, 119251.

Sustainability of Europe's mobility systems. (2024). European Environment Agency, 10 October 2024. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/sustainability-of-europes-mobility-systems>. Erişim Tarihi: 22 Mart 2025.

Talu, N. (2019). Avrupa Birliği İklim Politikaları. İklim Değişikliği Eğitim Modülleri Serisi 3.

Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European journal of operational research*, 130(3), 498-509.

Tone, K. (2010). Variations on the theme of slacks-based measure of efficiency in DEA. *European journal of operational research*, 200(3), 901-907.

Tsakalidis, A., van Balen, M., Gkoumas, K., & Pekar, F. (2020). Catalyzing sustainable transport innovation through policy support and monitoring: The case of TRIMIS and the European green deal. *Sustainability*, 12(8), 3171.

Tsaples, G., & Papathanasiou, J. (2021). Data envelopment analysis and the concept of sustainability: A review and analysis of the literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110664.

Türkoğlu, S. P. (2016). OECD ülkelerinin enerji etkinliklerinin ve dinamiklerinin incelenmesi.

Umar, M., Ji, X., Kirikkaleli, D., & Xu, Q. (2020). COP21 Roadmap: Do innovation, financial development, and transportation infrastructure matter for environmental sustainability in China?. *Journal of environmental management*, 271, 111026.

United Nations (UN). (2024). The Sustainable Development Goals Report (SDGR).

United Nations Framework Convention On Climate Change (UNFCCC), (1992).

- Ün, T. (2010). ÖZEL SERMAYELİ MEVDUAT BANKALARI PERSONEL ve ŞUBE SAYILARI: PANEL VERİ MODELİ YAKLAŞIMI. *Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 12(2), 217-228.
- Vaninsky, A. (2018). Energy-environmental efficiency and optimal restructuring of the global economy. *Energy*, 153, 338-348.
- Wang, C. N., Le, T. Q., Yu, C. H., Ling, H. C., & Dang, T. T. (2022). Strategic environmental assessment of land transportation: an application of DEA with undesirable output approach. *Sustainability*, 14(2), 972.
- Wang, Z., He, W., & Chen, K. (2016). The integrated efficiency of economic development and CO2 emissions among Asia Pacific Economic Cooperation members. *Journal of Cleaner Production*, 131, 765-772.
- Wei, F., Zhang, X., Chu, J., Yang, F., & Yuan, Z. (2021). Energy and environmental efficiency of China's transportation sectors considering CO2 emission uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 97, 102955.
- World Economic Forum (WEF). (2024). Global Risk Report. 19th Edition.
- Xie, B. C., Shang, L. F., Yang, S. B., & Yi, B. W. (2014). Dynamic environmental efficiency evaluation of electric power industries: Evidence from OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) and BRIC (Brazil, Russia, India and China) countries. *Energy*, 74, 147-157.
- Yang, X., & Yu, X. (2018, August). The technological innovation efficiency of China's high-speed rail enterprises based on DEA approach. In *2018 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)* (pp. 1-9). IEEE.

- Zanella, A., Camanho, A. S., & Dias, T. G. (2015). Undesirable outputs and weighting schemes in composite indicators based on data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 245(2), 517-530.
- Zeng, J., Soriano, D. R., & Ren, J. (2022). Innovation efficiency: a bibliometric review and future research agenda. *Trends in Asia Pacific Business and Management Research*, 65-84.
- Zhao, J., Jiang, Y., & Zhang, X. (2015). Research on transportation efficiency evaluation based on DEA model. *In CICTP 2015* (pp. 2364-2375).
- Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2008). A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. *European journal of operational research*, 189(1), 1-18.
- Zhu, Y., Yang, F., Wei, F., & Wang, D. (2022). Measuring environmental efficiency of the EU based on a DEA approach with fixed cost allocation under different decision goals. *Expert Systems with Applications*, 208, 118183.

## ÖZET

Bu çalışmada, Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde ulaştırma sektörü bağlamında çevresel enerji etkinliği çok boyutlu bir yaklaşımla analiz edilmiştir. Çalışmanın temel amacı, çevre, ekonomi, altyapı ve inovasyon bileşenlerinin ulaştırma sistemleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve ülkelerin çevresel etkinlik düzeylerini karşılaştırmalı olarak ölçmektir. Sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda geliştirilen bu tez, ulaştırma sektörünün çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla hangi stratejilerin öncelikli olması gerektiği konusunda politika yapıcılara rehberlik etmeyi hedeflemektedir.

Araştırmanın kuramsal çerçevesi, ulaşım sistemleri ile çevresel, ekonomik ve teknolojik göstergeler arasındaki ilişkileri kapsamlı biçimde ele almaktadır. Tezin metodolojik kısmında, Veri Zarflama Analizi (VZA) kullanılarak geliştirilen üç farklı model aracılığıyla, 2023 yılı için çevresel etkinlik ölçülmüştür. Bu modeller sırasıyla; (1) ekonomik göstergelere dayalı çevresel etkinlik, (2) ulaşım altyapısına dayalı çevresel etkinlik ve (3) inovasyon kapasitesine dayalı çevresel etkinlik analizlerini içermektedir. Çalışmada Avrupa Birliği üyesi ülkeler, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler şeklinde gruplandırılarak karar birimleri olarak ele alınmış ve bu gruplar arasında karşılaştırmalı analiz gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen bulgulara göre, gelişmiş AB ülkeleri genel olarak daha yüksek çevresel enerji etkinliği skorlarına sahiptir. Bu durum, bu ülkelerde çevre dostu politikaların, akıllı altyapı sistemlerinin ve teknolojik yeniliklerin etkin bir şekilde uygulanmakta olduğunu göstermektedir. Gelişmekte olan ülkelerde ise altyapı yatırımlarında stratejik planlama eksiklikleri, düşük Ar-Ge harcamaları ve sürdürülebilirlik kriterlerinin yeterince benimsenmemesi gibi etkenlerin çevresel etkinlik düzeylerini sınırladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte bazı gelişmekte olan ülkelerin, sınırlı kaynaklara rağmen yüksek etkinlik

puanlarına ulaşması, doğru politika bileşimlerinin etkin sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir.

Çalışma, ulaştırma sektörünün çevresel sürdürülebilirlik bağlamında yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik, yönetsel ve yenilikçi politikalarla da entegre edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca politika önerileri, AB düzeyinde yürütülen programlar ve fonlara erişimin artırılması, düşük karbonlu ulaştırma sistemlerine geçişin hızlandırılması, inovasyonun yaygınlaştırılması ve kurumsal kapasitenin güçlendirilmesi yönünde somut öneriler içermektedir.

Sonuç olarak bu tez, ulaştırma sektörünün sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda nasıl dönüştürülebileceğini veri temelli bir yaklaşımla ortaya koymakta ve Avrupa Birliği ülkeleri bağlamında çevresel enerji etkinliğinin çok boyutlu bir analizini sunarak literatüre ve politika yapıcı çevrelere özgün bir katkı sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Çevresel Etkinlik, Ulaştırma Sektörü, Veri Zarflama Analizi (VZA), Avrupa Birliği, İnovasyon, Altyapı, Sürdürülebilirlik.

## **ABSTRACT**

This study conducts a multidimensional analysis of environmental energy efficiency within the transportation sector of European Union (EU) countries. The primary aim of the research is to evaluate the influence of environmental, economic, infrastructural, and innovation-based factors on transportation systems, and to comparatively measure the environmental efficiency levels across countries. In alignment with sustainable development goals, this doctoral thesis seeks to provide a strategic framework for policymakers aiming to reduce the negative environmental impacts of transportation systems.

The theoretical framework of the study comprehensively examines the interactions between transportation systems and environmental, economic, and technological indicators. In the methodological section, environmental energy efficiency is measured using Data Envelopment Analysis (DEA) through the development of three distinct models: (1) environmental efficiency based on economic indicators, (2) environmental efficiency based on transportation infrastructure, and (3) environmental efficiency based on innovation capacity. The EU member states are categorized into developed and developing countries, and a comparative efficiency analysis is performed between these groups.

Findings reveal that developed EU countries generally exhibit higher environmental energy efficiency scores, indicating effective implementation of eco-friendly policies, smart infrastructure systems, and technological innovations. In contrast, developing countries often face limitations due to lack of strategic infrastructure planning, low R&D investment, and insufficient integration of sustainability criteria. Nonetheless, some developing countries have achieved high efficiency scores despite limited resources, demonstrating that appropriate policy combinations can yield impactful outcomes.

The study underscores that the transformation of the transportation sector toward environmental sustainability must be supported not only by technical improvements, but also through integrated economic, managerial, and innovation-based policies. Moreover, the policy recommendations focus on enhancing access to EU-level funding and programs, accelerating the transition to low-carbon transportation systems, promoting innovation, and strengthening institutional capacity.

In conclusion, this thesis presents a data-driven approach to understanding how the transportation sector can be transformed in line with sustainability objectives. By providing a multidimensional analysis of environmental energy efficiency within the EU context, it offers original contributions to both the academic literature and policy-making processes.

**Keywords:** Environmental Efficiency, Transportation Sector, Data Envelopment Analysis (DEA), European Union, Innovation, Infrastructure, Sustainability.