

Araştırma Makalesi

Avrupa ve Orta Asya Ülkelerinde Enerji Verimliliğinin Veri Zarflama Analizi (VZA) ile Değerlendirilmesi: Gelir Grupları, Yapısal Değişim ve CO₂ Emisyon Yoğunluğu Üzerine Bir Analiz (2011-2022)

Ayşegül BAYKUL

Süleyman Demirel Üniversitesi

aysegulbaykul@sdu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7581-9972

Öz

Bu çalışma, 2011–2022 döneminde 42 Avrupa ve Orta Asya ülkesinde enerji verimliliğini incelemekte olup, ülkeler Dünya Bankası sınıflamasına göre yüksek gelirli ve üst orta gelirli olarak kategorize edilmiştir. Modelde sermaye, işgücü, birincil enerji ve elektrik tüketimi girdi; nominal GSYH arzu edilen çıktı, CO₂ emisyonları ise arzu edilmeyen çıktı olarak kullanılmıştır. Bulgular, yüksek gelirli ülkelerde enerji tüketiminin azalırken, üst orta gelirli ülkelerde arttığını göstermektedir. Enerji ve emisyon yoğunluğu açısından yüksek gelirli ülkeler daha verimli olup, ortalama verimsizlik oranı %3,1 iken üst orta gelirli ülkelerde bu oran %5'tir. Bu sonuçlar, enerji verimliliği politikalarının gelir düzeyine bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Enerji verimliliği, üretim fonksiyonu, Veri Zarflama Analizi, birincil enerji kullanımı, elektrik kullanımı

JEL Sınıflandırma Kodları: Q43, R19, C61

Evaluation of Energy Efficiency in European and Central Asian Countries Using Data Envelopment Analysis (DEA): An Analysis of Income Groups, Structural Change, and CO₂ Emission Intensity (2011-2022)¹

Abstract

This study examines energy efficiency in 42 European and Central Asian countries over the period 2011–2022, categorized as high-income and upper-middle-income according to the World Bank classification. The model incorporates capital, labor, primary energy, and electricity consumption as inputs, nominal GDP as the desired output, and CO₂ emissions as the undesirable output. The results indicate that while energy consumption has declined in high-income countries, it has increased in upper-middle-income ones. High-income economies are more efficient in terms of energy and emissions intensity, with an average inefficiency of 3.1%, compared to 5% in upper-middle-income countries. These findings highlight the income-related differences in energy efficiency policies.

Keywords: Energy efficiency, production function, Data Envelopment Analysis, primary energy, electricity

JEL Classification Codes: Q43, R19, C61

¹ Extended abstract is presented at the end of the article.

Geliş Tarihi (Received): 28.11.2024 – Kabul Edilme Tarihi (Accepted): 28.02.2025

Atıfta bulunmak için / Cite this paper:

Baykul, A. (2025). Avrupa ve Orta Asya ülkelerinde enerji verimliliğinin Veri Zarflama Analizi (VZA) ile değerlendirilmesi: Gelir grupları, yapısal değişim ve CO₂ emisyon yoğunluğu üzerine bir analiz (2011-2022). *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15(4), 1278-1304. doi: 10.18074/ckuiibfd.1592832

1. Giriş

Ekonomik büyüme ile sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin uyumlu hale getirilmesi amacıyla literatürde enerji girdileri ve yeşil GSYH'ye yönelik artan bir ilgi gözlemlenmektedir. Her ne kadar temiz enerji kullanımı giderek artsa da son 40 yılda küresel birincil enerji tüketimi 270.5 exajoule (EJ)'den 580 exajoule (EJ)'ye yükselmiştir. Bu dönemde tüketilen birincil enerjinin yaklaşık %85'i fosil yakıtlar (kömür, petrol ve doğal gaz) kaynaklıdır (Kober, Schiffer, Densing ve Panos, 2020). Fosil yakıtlara olan bu yüksek bağımlılık, CO₂ emisyonlarını ve diğer sera gazlarını artırarak küresel iklim değişikliğine neden olmaktadır. CO₂ emisyonları, çevredeki toplam sera gazlarının (GHG) %60'ını oluşturan en büyük kirleticidir (Khan ve Öztürk, 2021). Bu bağlamda, enerji verimliliği yönetimi hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Toplam enerji verimliliği (GSYH'nin toplam enerji kullanımına oranı), bu emisyonların önemli bir belirleyicisidir (Raupach vd., 2007; Peters vd., 2017). Enerji verimliliği, endüstrilerin sürdürülebilir kalkınma için sera gazı emisyonlarını azaltabilecekleri en önemli ve maliyet açısından etkili araçlardan biridir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2023 Küresel Enerji Verimliliği Raporu, dünya genelinde enerji verimliliğindeki temel eğilimleri ve gelişmeleri vurgulamaktadır. Raporda 2023'te küresel enerji yoğunluğundaki (bir ekonominin enerji verimliliğinin temel göstergesi) iyileşme oranının, bir önceki yılki %2'lik orandan %1,3'e düşeceği tahmin edilmektedir. Bu düşüş, uzun vadeli eğilimlerin gerisinde kalmakta ve büyük ölçüde küresel enerji talebindeki artışa bağlı olduğu görülmektedir. 2030 yılına kadar verimlilik artışını iki katına çıkarmayı hedefleyen bir öneri, çeşitli uluslararası platformlarda gündeme getirilmiştir. Buna karşılık, dünya genelinden liderler, güçlendirilmiş politika uygulamalarına desteklerini belirtmiş ve diğer hedeflerin yanı sıra, bu hedefin COP28²'de uygulanması gerekliliğini vurgulamışlardır.

Enerji, ekonomik büyüme, sanayileşme ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir faktördür. Neoklasik büyüme modeli (Solow, 1956) ve endojen büyüme teorileri (Romer, 1990) çerçevesinde, enerji girdisinin üretim sürecinde sermaye ve emek kadar belirleyici olduğu vurgulanmaktadır. Özellikle sanayileşme sürecinde enerji tüketiminin artması, ekonomik büyümeyi destekleyen en önemli faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Stern, 2011). Ancak bu büyüme, artan enerji tüketimi nedeniyle çevresel bozulmayı da beraberinde getirmektedir. Çevresel Kuznets Eğrisi (Environmental Kuznets Curve- EKC) hipotezi, ekonomik büyümenin belirli bir aşamasına kadar çevresel bozulmayı artırabileceğini, ancak belirli bir gelir seviyesinin üzerinde sürdürülebilir enerji politikalarının devreye girmesiyle çevresel etkinin azalabileceğini öne sürmektedir (Grossman ve Krueger, 1995).

² COP28, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne (UNFCCC) taraf olan ülkelerin katıldığı yıllık iklim değişikliği konferansıdır.

Bu bağlamda enerji verimliliği hem ekonomik büyümeyi sürdürülebilir kılmak hem de çevresel etkileri minimize etmek açısından kritik bir rol oynamaktadır. Enerji yoğunluğunun azaltılması, yani ekonomik çıktının bir birimi başına tüketilen enerji miktarının düşürülmesi, enerji bağımlılığını ve sera gazı emisyonlarını azaltarak hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlamaktadır (IEA, 2021). Özellikle fosil yakıtların küresel enerji arzındaki payının yüksek olması, karbon salınımının en büyük kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir (IPCC, 2022). Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ve enerji verimliliği politikalarının uygulanması, düşük karbonlu büyüme stratejilerinin temel bileşenlerinden biri olarak görülmektedir (Apergis ve Payne, 2010). Bu doğrultuda, çalışmamız enerji verimliliğinin Avrupa ve Orta Asya bölgesinde ülkeler arasındaki farklılaşmasını inceleyerek, verimlilik düzeyleri arasındaki gelir grubu temelli ayrışmayı ve bunun ekonomik büyüme ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Enerji verimliliği genellikle mutlak yerine göreceli ölçütlerle değerlendirilmektedir. Bu çerçevede, enerji verimliliğini değerlendirmek amacıyla kullanılan üç temel gösterge grubu termodinamik (bir cihazın enerji verimliliğini fiziksel ve bilimsel temellerle ölçen göstergeler), fiziksel (birim fiziksel çıktı başına enerji gereksinimleri) ve ekonomik faktörlerden oluşmaktadır (Ang, 2006). Zheng, Xu ve Jia (2022), enerji verimliliğini etkileyen faktörleri yapısal değişim, teknolojik ilerleme ve diğer ekonomik değişkenler olarak üç ana kategoriye ayırmıştır. Endüstri yapısındaki değişimlerin enerji verimliliği üzerindeki etkisi “yapısal bonus hipotezi” ile açıklanabilir. Bu hipoteze göre, enerji faktörü düşük verimlilik ya da yavaş verimlilik artışı gösteren bir sektörden, yüksek verimlilik ya da hızlı verimlilik artışı gösteren bir sektöre kaydırıldığında, tüm endüstrilerin genel enerji verimliliği artar (Peneder, 2003). Dolayısıyla, endüstriyel yapı değişikliğinin enerji verimliliği üzerindeki etkisi göz ardı edilemez. Genel olarak, endüstriyel yeniden yapılanmanın enerji verimliliğini artırdığı düşünülmektedir (Shen ve Lin, 2021; Yu, 2020). Ancak, teknolojik ilerlemenin enerji tüketimini artırma potansiyeline sahip olduğu “enerji geri tepme etkisi” de gözlemlenebilir (Wang, Han ve Lu, 2016; Zhang, Peng, ve Su, 2017). Bu nedenle, teknolojik ilerleme ile enerji verimliliği arasındaki ilişki her zaman karmaşıktır ve net bir şekilde tanımlanması zordur. Daha yaygın ekonomik değişkenler arasında kişi başına düşen GSYH (Topcu, Altinoz ve Aslan., 2020; Lin ve Sai, 2022), enerji tüketim yapısı (González-Torres, Pérez-Lombard, Coronel ve Maestre, 2021; Raza ve Lin, 2022) ve nüfus (Rafiq, Salim ve Nielsen, 2016; Nikbakht, Hajiani ve Ghorbanpur, 2023) yer almaktadır (Wang, Lu, Chen, Yi, ve Cui, 2024).

Üretim süreçlerinde enerji bir girdi, kirlilik ise istenmeyen bir çıktı olarak ele alındığı için hem enerjiyi hem de çevresel verimliliğini birlikte değerlendiren toplam faktör verimliliği modeli kullanılmalıdır. Toplam faktörlü enerji verimliliği (TFEV), çoklu girdi ve çoklu çıktıyı dikkate alarak enerji kullanımının gerçek durumunu daha doğru bir şekilde yansıtır. Bunun nedeni, enerjinin tek başına

doğrudan ekonomik çıktılar üretmemesi, aksine çıktıları elde edebilmek için sermaye ve emek gibi diğer girdilerle birlikte kullanılması gerektiğidir. Bu yaklaşımla, enerji verimliliği daha kapsamlı bir perspektiften değerlendirilebilir (Hu ve Wang, 2006). TFEV, belirli bir çıktı seviyesi için gereken gerçek girdiye optimum enerji girdisinin oranını hesaplayarak değerlendirmektedir. Veri zarflama analizi (VZA), çoklu girdi ve çıktı durumunda verimlilik değerini hesaplamak için uygun olan klasik bir parametrik olmayan toplam faktör verimliliği ölçüm yöntemidir (Charnes, Cooper ve Rhodes, 1978).

Bu çalışmada, Dünya Bankası sınıflamasına göre verileri tam olan 42 Avrupa ve Orta Asya ülkesi 2011-2022 dönemi için yüksek gelirli ve üst orta gelirli ülkeler olarak iki kategoriye ayrılarak analize dahil edilmiştir. Analiz yöntemi olarak VZA kullanılmıştır. Bu ülkelerin seçilme nedeni, Avrupa ve Orta Asya bölgesinin enerji verimliliği açısından farklı dinamikler sergilemesi ve gelir seviyesine bağlı olarak enerji yoğunluğu, karbon emisyonları ve sürdürülebilirlik politikalarında belirgin farklılıklar göstermesidir. Ayrıca, bu bölge ülkeleri küresel enerji tüketiminde önemli bir paya sahip olup, enerji dönüşümü ve iklim değişikliği politikaları açısından kritik bir konumda yer almaktadır. Veriler ilgili veri tabanlarından elde edilmiş en güncel veriler olup 2011-2022 yılları arasındaki dönemi kapsamaktadır. Çalışma, enerji tüketimi ile çevresel emisyonlar arasındaki ilişkiyi, toplam faktör verimliliği değerlendirme modeli kullanarak ele almaktadır. Bu model, enerji tüketimini bir girdi olarak alırken, GSYH'yi istenen çıktı olarak ve CO₂ emisyonlarını istenmeyen çıktı olarak tanımlamaktadır. Böylece, enerji verimliliği ile çevresel verimlilik arasındaki etkileşimleri daha kapsamlı bir şekilde inceleme imkânı sunmaktadır.

2. Literatür

Enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişki, son yıllarda enerji politikaları literatüründe önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Gelişen küresel çevre sorunları ve artan enerji talepleri, enerji verimliliğinin ekonomik büyüme ve çevresel etkiler üzerindeki rolünü inceleyen çalışmaların sayısını artırmıştır. Yüksek gelirli ülkeler genellikle enerji verimliliği açısından daha yüksek performans gösterirken, düşük gelirli ülkelere bu performansın daha düşük olduğu gözlemlenmektedir (Stern, 2012; Sorrell, 2009). Ancak, gelir seviyesi ve enerji yoğunluğu arasındaki bu ilişki sabit değildir; gelir seviyeleri arttıkça enerji verimliliği de artma eğilimindedir (Mardani, Streimikiene, Cavallaro, Loganathan ve Khoshnoudi, 2019). Çalışma kapsamına giren mevcut literatür enerji tüketimi, ekonomik çıktı ve çevresel etkiler arasındaki ilişkiyi çeşitli perspektiflerden incelemekte ve bu faktörlerin ülkeler arası farklılıklarını vurgulamaktadır.

Choi, Zhang ve Zhou, (2012), çalışmalarında enerjiyle ilişkili CO₂ emisyonlarının enerji verimliliği, potansiyel emisyon azaltımları ve marjinal azaltım maliyetlerini tahmin etmek için parametrik olmayan verimlilik analizi teknikleri kullanmışlardır. Çin'in CO₂ emisyonlarının potansiyel azaltımları ve verimliliğini tahmin etmek için

bir non-radial slacks-based VZA modeli uygulanmıştır. Daha sonra, slacks-based VZA modelinin ikili modeli, CO₂ emisyonlarının marjinal azaltım maliyetlerini tahmin etmek için kullanılmıştır. 2001-2010 yılları arasındaki Çin'in panel verileri temel alınarak bir ampirik çalışma yapılmış ve bazı politika önerileri tartışılmıştır.

Apergis, Aye, Barros, Gupta, ve Wanke, (2015), seçilen OECD ülkelerinin enerji verimliliği SBM-Undesirable yöntemiyle analiz etmektedir. Enerji verimliliği araştırmaları, basit kısmi enerji verimliliği ölçümlerinden (örneğin, kişi başına enerji tüketimi, GSYH ile enerji tüketimi oranı) karmaşık bileşik indeks yaklaşımlarına (örneğin, VZA — Veri Zarflama Analizi, mesafe fonksiyonları, Malmquist verimlilik indeksi) kadar çeşitli yöntemler benimsemiştir. Sonuçlar, verimlilik seviyelerinin yüksek olduğunu ve zamanla azaldığını göstermektedir. Bağlamsal değişkenlerin verimlilik düzeyine etkisi incelendiğinde, en yüksek verimlilik seviyelerinin AB ülkelerinde, ardından NAFTA, G7 ve Asya Kaplanlarında bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, sermaye yoğun ülkelerin işgücü yoğun ülkelere göre daha enerji verimli olduğu görülmektedir. OECD ülkelerindeki azalan verimlilik düzeyi endişe kaynağıdır; enerji verimliliğini artırmaya yönelik politikaların gerekliliği vurgulanmaktadır.

Mardani, Zavadskas, Streimikiene, Jusoh ve Khoshnoudi, (2017), dünya genelinde enerji verimliliği sorunlarının geliştirilmesinde uygulanan farklı VZA modelleri incelenmiş ve özetlenmiştir. Bu kapsamlı incelemeyi gerçekleştirmek için 2006 ile 2015 yılları arasında 45 yüksek sıralamalı dergide yayımlanan 144 akademik makale gözden geçirilmiştir. Seçilen makaleler, yayımlanma yılı, yazarların milliyetleri, çalışma kapsamı, zaman dilimi, uygulama alanı, çalışma amacı, sonuçlar ve çıktılar gibi kriterlere göre kategorize edilmiştir. İnceleme sonuçları, VZA'nın, girdi ve çıktılar arasındaki üretim fonksiyonunun neredeyse mevcut olmadığı veya elde edilmesinin son derece zor olduğu enerji verimliliği sorunları için gelecekteki analizlerde iyi bir değerlendirme aracı olma potansiyelini gösterdiğini ortaya koymuştur.

Wu, Chen, Shang, ve Wu, (2018), çalışmalarında 2006-2010 döneminde Asya-Pasifik Ekonomik İş birliği (APEC) ekonomileri için enerji kullanımı verimliliği, CO₂ emisyon verimliliği ve çevresel-ekonomik verimlilik (EEE) ölçmek amacıyla çevresel VZA tabanlı modeller önermektedir. Modellerde, nüfus ve toplam birincil enerji tüketimi girdi olarak kullanılırken, GSYH ve CO₂ emisyonları sırasıyla istenen ve istenmeyen çıktılarını temsil etmektedir. 20 APEC ekonomisinden elde edilen ampirik sonuçlar, 2006'dan 2010'a kadar enerji kullanımı verimliliği açısından Avustralya, Brunei, Hong Kong ve Singapur'un beş yıl boyunca verimli ülkeler olarak tanımlandığını göstermektedir. CO₂ emisyon verimliliği açısından ise Brunei, Hong Kong ve Singapur'un aynı dönemde verimli ülkeler olduğu belirlenmiştir. EEE açısından, APEC'teki çoğu ülkenin çevresel verimlilikten daha yüksek ekonomik verimlilik sergilediği görülmüştür. Ayrıca, enerji kullanımı

verimliliği ve CO₂ emisyon verimliliği ile EEE değeri arasında ($p < 0.01$) anlamlı bir ilişki bulunmuştur.

Iqbal, Altalbe, Fatima, Ali ve Hou, (2019), 2013-2017 yılları arasında (VZA) kullanarak 20 sanayi ülkesinin enerji tüketimi, karbon emisyonu ve ekonomik-çevresel verimliliklerini ölçmeyi amaçlamaktadır. Araştırma, enerji verimliliği, CO₂ emisyon verimliliği ve çevresel verimlilik trilemmasını ele almıştır. Sonuçlara göre, Avustralya, Çin, Japonya, Suudi Arabistan ve Polonya en yüksek enerji verimliliğine sahipken, Meksika, Endonezya, Rusya ve Brezilya en düşük verimliliğe sahip ülkeler olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Rusya en yüksek enerji yoğunluğuna sahipken, Polonya en düşük skora sahiptir. CO₂ emisyon verimliliğinde ise Brezilya, Fransa ve Suudi Arabistan en verimli ülkeler arasındadır. Çoğu ülkenin ekonomik verimliliği, çevresel verimlilikten daha yüksek performans göstermektedir. Çalışma, enerji politikası oluşturucular için önemli bilgiler sunmaktadır.

Wang, Le ve Nguyen, (2019), 25 ülkenin enerji verimliliğini ve enerji verimliliği iyileşmesini ölçmeyi amaçlamaktadır. İlk olarak, verimlilik puanlarını elde etmek için bir VZA aylak tabanlı model (SBM) kullanılmıştır. İkinci aşamada, 2010-2017 dönemi boyunca iyileşmeyi incelemek için Malmquist Üretkenlik Endeksi (MPI) uygulanmıştır. Çalışmanın bulguları, gelişmiş ülkelerin aynı girdileri kullanarak gayri safi yurtiçi hasıla (GSYH) büyümesi ile CO₂ emisyonları arasında daha dengeli bir gelişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, Hindistan ve Çin'in, 2010-2017 döneminde enerji yoğunluğunu artırdığı, ancak enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarının devam eden bir artış sergileyerek enerji verimliliği açısından en kötü ülkeler oldukları tespit edilmiştir.

Wang, Nguyen ve Chang, (2021), çalışmalarında sürdürülebilir kalkınma bağlamında çevresel verimliliği değerlendirmek için (VZA) yönteminin genişletilmiş bir versiyonu olan “istenmeyen çıktı modelini” önermektedir. 2005-2019 döneminde Asya'nın en büyük 20 ekonomisine ait veriler kullanılarak her ülkenin çevresel verimliliği ölçülmüş ve sınıflandırılmıştır. Sonuçlar, Japonya'nın ekonomik gelişme ile çevresel koruma arasında denge kurarak en yüksek çevresel verimliliğe sahip ülkelerden biri olduğunu göstermiştir. Düşük verimliliğe sahip ülkeler için iyileştirme önerileri sunulmuştur. Çalışma, çıktıların ağırlıklarının dikkate alınacağı daha hassas modellerin gelecekteki araştırmalar için önerilebileceğini belirtmiştir.

Kang ve Kang (2022), çalışmalarında 104 ülkenin enerji yoğunluğu verimliliğini inceleyerek, ülkeleri gelir gruplarına ayırarak incelemiştir. Enerji yoğunluğu verimliliği ölçümünün yanı sıra, GSYH ve CO₂ emisyonlarının enerji yoğunluğu verimliliği üzerindeki etkisi de araştırılmaktadır. Fosil yakıtların hem GSYH hem de CO₂ emisyonlarıyla güçlü bir ilişkisi olduğu için, çalışmada fosil yakıtların enerji verimliliği ve enerji yoğunluğu verimliliği modelleri CO₂ emisyonlarını da içerecek şekilde birlikte sunulmuştur. CO₂ emisyonları hem bir kısıt değişkeni hem

de arzu edilen çıktı ile birleştirilmiş bir ürün olarak ele alınmıştır. Enerji verimliliğinin aksine, enerji yoğunluğu verimliliği yüksek gelirli gruplarda daha yüksek bulunmuştur ve bu durum, CO₂ emisyonları hem kısıt hem de birleştirilmiş ürün olarak dahil edildiğinde de değişmemiştir. Özellikle ülkelerin heterojenliği beş grup yerine ortalama-varyans yaklaşımıyla dört gruba dönüştürüldüğünde, her bir grubun enerji yoğunluğu verimliliği daha belirgin farklılıklar göstermiştir. Enerji yoğunluğu verimliliği en çok, gelir artışı ve çevresel düzenlemelerin tüm gelir gruplarında eş zamanlı olarak uygulanması durumunda iyileşme göstermiştir. Bu nedenle, enerji yoğunluğu verimliliğini artırmak için CO₂ emisyonlarının azaltılması, yalnızca yüksek gelirli ülkelerde değil, düşük gelirli ülkelerde de gereklidir sonucuna ulaşılmıştır.

Fong, Sun ve Chen, (2022), çalışmalarında, 2010-2016 döneminde Guangdong-Hong Kong-Makao Büyük Körfez Bölgesi'ndeki (GBA) 11 şehir arasında enerji tüketimi ile istenmeyen çıktı CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi incelemek için üç aşamalı aylak tabanlı VZA (SBM) modelini uygulamaktadır. Girdi değişkenleri olarak işgücü, sermaye ve enerji kaynakları seçilmiş, çıktı değişkenleri olarak ise GSYH ve CO₂ emisyonları kullanılmıştır. İlk ve üçüncü aşamada SBM-VZA modeli, ikinci aşamada ise SFA analizi ile yapılan çalışmada, CO₂ emisyonları olumsuz bir sonuç olarak ele alınmış ve rastgele istatistiksel sapmalar ile dışsal çevresel etkiler belirlenmiştir. Sonuçlar, GBA şehirlerinin ortalama verimliliğinin 0.708 olduğunu, yalnızca Shenzhen, Macao SAR ve Hong Kong SAR'nın çalışma dönemi boyunca verimlilik değerinin "1" olduğunu göstermiştir. Bulgulara dayanarak, GBA şehirlerinin sürdürülebilir kalkınma yönünde önerilerde bulunmaktadır.

Shu, Liao, Yang ve Yu, (2024), 2000-2017 yılları arasında dünya genelinde 168 ekonominin enerji verimliliğini (EV) değerlendirmek için süper verimlilik SBM-DEA modelini kullanarak mekânsal ve zamansal kalıplara odaklanan detaylı bir inceleme sunmuşlardır. Ana bulgular şunlardır: (1) Küresel EV başlangıçta artış gösterirken, daha sonra bir düşüş yaşanmış ve 2009 sonrasında sürekli bir azalma gözlemlenmiştir; küresel mali krizin EV üzerindeki etkisi, ekonomi grupları arasında değişkenlik göstermektedir. (2) Mekânsal olarak, EV belirgin bir coğrafi kümeleme etkisi göstermekte olup, bölgeler, çalışma süresi boyunca yüksek ve düşük EV konsantrasyonlarıyla farklılık göstermektedir. (3) Küresel EV eşitsizliği genel olarak azalmış olsa da gelir grupları içindeki farklılıklar, EV eşitsizliğinin baskın kaynağı haline gelmiştir sonucuna ulaşmışlardır.

Son yıllarda, enerji verimliliği ile ekonomik büyüme ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi inceleyen farklı modelleme çalışmaları yapılmıştır.

Bennedsen, Hillebrand, ve Lykke (2024) çalışmalarında, 1971-2019 dönemi için bir non-linear state-space modeli kullanarak, enerji tüketimi, emisyonlar ve makroekonomik büyüme arasındaki dinamikleri analiz etmektedir. Bu çalışma, CO₂ emisyonlarının zaman içinde değişen emisyon dönüşüm faktörleriyle

modellendiğini ve enerji verimliliğinin tarihsel eğilimlerden önemli ölçüde farklılaşması gerektiğini vurgulamaktadır. Model, enerji verimliliğinin doğrusal artış göstermesi durumunda ekonomik büyümenin öngörülen seviyelere ulaşamayacağını, ancak enerji verimliliğinin üstel bir ivmeyle artması halinde büyüme oranlarının SSP (Shared Socioeconomic Pathways) ve IEA (International Energy Agency) projeksiyonlarına daha yakın olacağını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, sürdürülebilir ekonomik büyümenin sağlanabilmesi için mevcut enerji politikalarının daha radikal dönüşümlere ihtiyaç duyduğunu göstermekte ve enerji verimliliğinde olağanüstü artışlar olmadan net sıfır hedeflerine ulaşmanın güç olacağını vurgulamaktadır.

Avrupa ve Orta Asya ülkelerine ait 2011-2022 dönemini kapsayan çalışma, enerji verimliliği literatürüne üç temel katkı sunmaktadır. Birincisi, mevcut literatür genellikle enerji verimliliğini ülke bazında veya küresel düzeyde ele alırken, bu çalışma Avrupa ve Orta Asya bölgesine odaklanarak, gelir grupları arasındaki farklılıkları detaylandırmaktadır. İkincisi, enerji verimliliğini yalnızca ekonomik çıktılar üzerinden değil, CO₂ emisyonlarını bir kısıt değişken olarak ele alarak çevresel sürdürülebilirlik perspektifinden de değerlendirmektedir. Üçüncüsü, üretim fonksiyonunda sermaye ve işgücü değişkenlerine ek olarak, birincil enerji tüketimi ve elektrik tüketimini enerji girdileri olarak modellemesi, enerji kullanımının daha kapsamlı bir çerçevede analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Bu yönleriyle çalışma, enerji verimliliği politikalarının şekillendirilmesine yönelik literatüre özgün katkılar sunmaktadır.

3. Veri Seti ve Yöntem

Bu çalışmada, Dünya Bankası sınıflamasına göre verileri tam olan 42 Avrupa ve Orta Asya ülkesi 2011-2022 dönemi için yüksek gelirli ve üst orta gelirli ülkeler olarak iki kategoriye ayrılarak analize dahil edilmiştir. Çalışmaya konu olan ülkeler Tablo.1’de sunulmuştur.

Tablo 1: Çalışmaya Konu Olan Ülkeler

Üst Gelir Grubu Ülkeler	Üst Orta Gelir Grubu Ülkeler
Avusturya, Belçika, Hırvatistan, Kıbrıs, Çekya, Danimarka, Estonya, Finlandiya, Fransa, Almanya, Yunanistan, Macaristan, İzlanda, İrlanda, İtalya, Letonya, Litvanya, Lüksemburg, Hollanda, Norveç, Polonya, Portekiz, Romanya, Rusya, Slovak Cumhuriyeti, Slovenya, İspanya, İsveç, İsviçre, Birleşik Krallık	Arnavutluk, Ermenistan, Azerbaycan, Belarus, Bulgaristan, Gürcistan, Kazakistan, Moldova, Karadağ, Sırbistan, Türkiye, Özbekistan

Simeonovski, Kaftandzieva ve Brock, (2021) tarafından yapılan çalışma baz alınarak üretim fonksiyonunu temsilen sermaye ve işgücü değişkenleri, enerji girdileri olarak birincil enerji tüketimi ve ikincil enerji olarak da elektrik tüketimi değişkenleri modele dahil edilmiştir. Çıktı olarak ülkelerin maksimize etmeyi amaçladığı değişken olarak nominal GSYH ve minimize etmeyi amaçladığı değişken olarak da CO₂ emisyonu kullanılmıştır. Aşağıdaki tabloda kullanılan değişkenlere ait bilgilere yer verilmiştir.

Tablo 2: Çalışmada Kullanılan Değişkenler

Değişkenler	Sembol	Birim	Kaynak
Girdi Değişkenleri			
İşgücü	L	Milyon	WDI
Sermaye Stoğu	K	US\$	WDI
Toplam birincil enerji tüketimi	BET	MMTOE	EIA
Elektrik tüketimi	ELT	kWh	EIA
Çıktı Değişkenleri			
Nominal GSYH	GSYH	US\$	WDI
CO₂ Emisyonu	CO ₂	MMtonnes	EIA

Seçilen değişkenler için veriler, ABD Enerji Bilgi İdaresi (EIA) ve Dünya Bankası Kalkınma Göstergeleri (WDI) veri tabanlarından toplanmıştır. Değişkenlere ait istatistiki veriler Tablo 3.'de sunulmuştur.

Tablo 3: Değişkenlere Ait Özet İstatistikler

Yıllar	İstatistiksel Ölçütler	DEĞİŞKENLER					
		GİRDİ DEĞİŞKENLERİ				ÇIKTI DEĞİŞKENLERİ	
		l	K	BET	ELEKT	GSYH	CO ₂
2011	ORT	9.37E+06	1.14E+11	6.90E+01	1.08E+02	5.48E+11	1.58E+03
	MİN	1.88E+05	8.87E+08	1.00E+00	3.57E+00	4.54E+09	2.52E+00
	MAX	7.61E+07	7.64E+11	7.66E+02	9.06E+02	3.75E+12	1.73E+03
	STD.SAPMA	1.44E+07	1.77E+11	1.31E+02	1.75E+02	8.77E+11	2.96E+02
2012	ORT	9.43E+06	1.08E+11	6.87E+01	1.09E+02	5.27E+11	1.59E+03
	MİN	1.89E+05	8.07E+08	9.34E-01	3.36E+00	4.09E+09	2.36E+00
	MAX	7.59E+07	7.17E+11	7.68E+02	9.30E+02	3.53E+12	1.74E+03
	STD.SAPMA	1.44E+07	1.69E+11	1.31E+02	1.78E+02	8.45E+11	2.98E+02

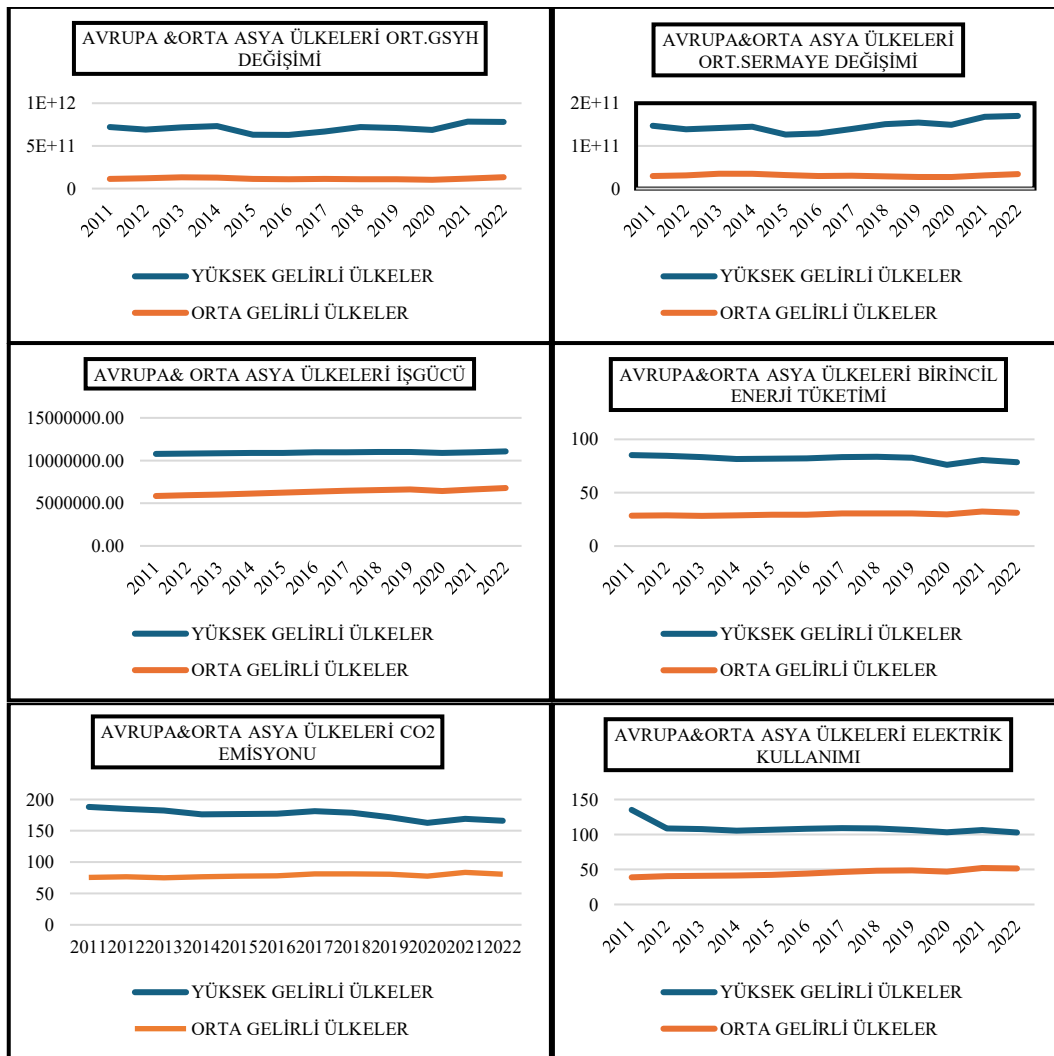
Tablo 3'ün devamı: Değişkenlere Ait Özet İstatistikler

2013	ORT	9.48E+06	1.12E+11	6.77E+01	1.08E+02	5.51E+11	1.54E+03
	MİN	1.93E+05	9.01E+08	8.66E-01	2.84E+00	4.47E+09	2.29E+00
	MAX	7.56E+07	7.43E+11	7.56E+02	9.20E+02	3.73E+12	1.69E+03
	STD.SAPMA	1.45E+07	1.74E+11	1.30E+02	1.77E+02	8.81E+11	2.92E+02
2014	ORT	9.53E+06	1.13E+11	6.65E+01	1.07E+02	5.60E+11	1.54E+03
	MİN	1.99E+05	8.73E+08	8.49E-01	2.75E+00	4.59E+09	2.26E+00
	MAX	7.54E+07	7.79E+11	7.63E+02	9.30E+02	3.89E+12	1.69E+03
	STD.SAPMA	1.45E+07	1.78E+11	1.29E+02	1.75E+02	9.06E+11	2.87E+02
2015	ORT	9.57E+06	9.94E+10	6.68E+01	1.08E+02	4.83E+11	1.54E+03
	MİN	2.04E+05	8.17E+08	9.27E-01	2.94E+00	4.05E+09	2.41E+00
	MAX	7.51E+07	6.72E+11	7.55E+02	9.29E+02	3.36E+12	1.69E+03
	STD.SAPMA	1.45E+07	1.54E+11	1.29E+02	1.76E+02	7.86E+11	2.88E+02
2016	ORT	9.65E+06	1.01E+11	6.70E+01	1.10E+02	4.81E+11	1.53E+03
	MİN	2.10E+05	1.08E+09	8.78E-01	2.90E+00	4.38E+09	2.19E+00
	MAX	7.52E+07	7.04E+11	7.55E+02	9.47E+02	3.47E+12	1.68E+03
	STD.SAPMA	1.46E+07	1.56E+11	1.28E+02	1.79E+02	7.82E+11	2.86E+02
2017	ORT	9.69E+06	1.08E+11	6.82E+01	1.11E+02	5.10E+11	1.55E+03
	MİN	2.13E+05	1.31E+09	9.07E-01	3.09E+00	4.86E+09	2.30E+00
	MAX	7.46E+07	7.53E+11	7.61E+02	9.56E+02	3.69E+12	1.70E+03
	STD.SAPMA	1.46E+07	1.67E+11	1.30E+02	1.80E+02	8.21E+11	2.90E+02
2018	ORT	9.73E+06	1.16E+11	6.85E+01	1.12E+02	5.46E+11	1.61E+03
	MİN	2.17E+05	1.61E+09	9.58E-01	3.11E+00	5.51E+09	2.52E+00
	MAX	7.45E+07	8.37E+11	7.89E+02	9.67E+02	3.97E+12	1.76E+03
	STD.SAPMA	1.47E+07	1.81E+11	1.33E+02	1.81E+02	8.79E+11	2.97E+02
2019	ORT	9.76E+06	1.19E+11	6.78E+01	1.11E+02	5.38E+11	1.61E+03
	MİN	2.21E+05	1.51E+09	9.24E-01	3.19E+00	5.54E+09	2.45E+00
	MAX	7.36E+07	8.29E+11	7.94E+02	9.79E+02	3.89E+12	1.75E+03
	STD.SAPMA	1.46E+07	1.80E+11	1.33E+02	1.80E+02	8.63E+11	2.92E+02
2020	ORT	9.63E+06	1.14E+11	6.28E+01	1.08E+02	5.20E+11	1.54E+03
	MİN	2.19E+05	1.33E+09	8.59E-01	2.97E+00	4.77E+09	2.28E+00
	MAX	7.31E+07	8.37E+11	7.56E+02	9.73E+02	3.89E+12	1.68E+03
	STD.SAPMA	1.44E+07	1.75E+11	1.25E+02	1.76E+02	8.36E+11	2.75E+02
2021	ORT	9.73E+06	1.29E+11	6.69E+01	1.13E+02	5.94E+11	1.70E+03
	MİN	2.22E+05	1.30E+09	9.20E-01	3.10E+00	5.86E+09	2.43E+00
	MAX	7.37E+07	9.11E+11	8.07E+02	1.03E+03	4.28E+12	1.85E+03
	STD.SAPMA	1.45E+07	1.99E+11	1.33E+02	1.86E+02	9.42E+11	3.01E+02

Tablo 3'ün devamı: Değişkenlere Ait Özet İstatistikler

2022	ORT	9.85E+06	1.31E+11	6.51E+01	1.10E+02	5.95E+11	1.70E+03
	MİN	2.31E+05	1.34E+09	9.35E-01	2.96E+00	6.23E+09	2.57E+00
	MAX	7.38E+07	9.02E+11	8.20E+02	1.03E+03	4.08E+12	1.84E+03
	STD.SAPMA	1.47E+07	2.01E+11	1.33E+02	1.83E+02	9.19E+11	3.00E+02

Aşağıdaki grafiklerde Avrupa ve Orta Asya bölgesinde yüksek gelirli ve üst orta gelirli ülkelerin işgücü, sermaye stoğu, birincil enerji kullanımı, elektrik kullanımı, Nominal GSYH ve CO₂ emisyonlarına ait verileri ortalamasına göre 2011-2022 yılları arasında gelişimi gösterilmektedir.



Grafik 1: Avrupa ve Orta Asya Bölgesinde Girdi ve Çıktı Değişkenlerinin Yıllara Göre Değişimi

İşgücü büyüklüğü açısından, yüksek gelirli ülkelerde 2011 yılı ortalaması ile 2022 yılı ortalaması karşılaştırıldığında %2,7 oranında bir artış görülmüştür. Üst orta gelirli ülkelerde ise bu artış %15,9 seviyesine ulaşmıştır. Aynı dönemde, sermaye stokunun her iki ülke grubunda da benzer şekilde yaklaşık %15 oranında büyüdüğü gözlemlenmiştir. Enerji tüketimi açısından, yüksek gelirli ülkelerde birincil enerji tüketimi %7,7 oranında azalırken, üst orta gelirli ülkelerde %9,5 oranında artış göstermiştir. Elektrik tüketiminde de benzer bir eğilim gözlenmiş; yüksek gelirli ülkelerde %24 oranında bir azalma meydana gelirken, üst orta gelirli ülkelerde %32,9 oranında bir artış söz konusu olmuştur. Aynı dönemde, karbon dioksit (CO₂) emisyonları yüksek gelirli ülkelerde %10 oranında azalırken, üst orta gelirli ülkelerde %5 oranında artış göstermiştir. Bu bulgular, işgücü büyümesi, enerji tüketimi ve çevresel etkiler açısından yüksek gelirli ve üst orta gelirli ülkeler arasında farklı dinamiklerin söz konusu olduğunu ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada bu farklılıkların dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Enerji yoğunluğu göstergeleri, bir ekonominin enerji verimliliğini ve sürdürülebilirliğini değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir. Bu göstergeler genellikle bir birim ekonomik çıktının (GSYH) üretilmesi için harcanan enerji miktarını ifade eder ve ülkelerin enerji kullanımı ile ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi anlamaya yardımcı olur. Enerji yoğunluğunun düşük olması, bir ülkenin enerji verimliliğinin yüksek olduğunun bir göstergesi olarak kabul edilir. Dünya Bankası veri tabanından alınan veriler doğrultusunda çalışma konusuna dahil olan yüksek gelirli ve yüksek orta gelirli ülkeler için birincil enerji yoğunluğu Tablo 4.'te verilmektedir.

Tablo 4: Birincil Enerjinin Enerji Yoğunluğu Seviyesi (MJ/2017 PPP GSYH)

Ülkeler	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
AUT	3.07	3.04	3.08	2.95	2.99	2.96	2.95	2.8	2.81	2.84	2.86	2.55
BEL	4.39	4.17	4.33	4.02	3.93	4.11	4.02	3.8	3.83	3.71	3.86	3.4
HRV	3.63	3.5	3.44	3.29	3.35	3.26	3.26	3.08	3.01	3.16	2.91	2.75
CYP	3.14	3.06	2.83	2.95	2.92	2.92	2.85	2.7	2.57	2.54	2.45	2.36
CZE	5.08	5.09	5.09	4.83	4.59	4.43	4.39	4.26	4.07	4.06	4.16	3.98
DNK	2.62	2.5	2.49	2.31	2.25	2.23	2.18	2.13	2.03	1.99	1.96	1.83
EST	6.43	5.74	6.27	5.79	4.97	5.98	5.49	5.21	4.22	3.92	3.73	4.12
FIN	5.83	5.71	5.67	5.81	5.5	5.54	5.34	5.37	5.19	5.07	5.15	4.82
FRA	3.84	3.83	3.82	3.63	3.65	3.54	3.46	3.37	3.26	3.18	3.23	2.83
DEU	3.26	3.27	3.32	3.11	3.08	3.02	2.95	2.85	2.76	2.69	2.7	2.47

Tablo 4'ün devamı: Birincil Enerjinin Enerji Yoğunluğu Seviyesi (MJ/2017 PPP GSYH)

GRC	3.34	3.57	3.22	3.17	3.19	3.13	3.15	3.01	2.91	2.85	2.71	2.58
HUN	4.3	4.15	3.94	3.77	3.85	3.81	3.81	3.61	3.46	3.56	3.48	3.12
ISL	15.65	15.11	15.07	14.77	13.47	11.93	12.12	12.68	12.25	12.92	12.33	11.93
IRL	2.22	2.22	2.19	1.97	1.65	1.7	1.51	1.41	1.33	1.21	1.09	0.97
ITA	2.75	2.72	2.67	2.52	2.6	2.54	2.54	2.47	2.43	2.47	2.51	2.3
LVA	3.91	3.79	3.65	3.58	3.39	3.3	3.31	3.35	3.16	3.08	3.1	2.88
LTU	3.88	3.78	3.44	3.33	3.3	3.29	3.3	3.22	3.06	3	2.94	2.59
LUX	2.97	2.87	2.7	2.53	2.41	2.27	2.29	2.34	2.31	2.02	1.98	1.71
NLD	3.65	3.7	3.62	3.37	3.38	3.37	3.3	3.16	3.03	3.05	2.95	2.53
NOR	3.81	3.96	4.14	3.75	3.31	3.6	3.74	3.65	3.43	3.44	3.43	3.21
POL	4.45	4.24	4.2	3.9	3.77	3.83	3.81	3.77	3.48	3.44	3.42	3.13
PRT	2.89	2.83	2.86	2.8	2.85	2.77	2.8	2.63	2.53	2.56	2.42	2.31
ROU	3.44	3.29	3	2.85	2.78	2.7	2.62	2.49	2.37	2.39	2.4	2.12
SVK	4.98	4.72	4.78	4.38	4.28	4.22	4.33	4.14	3.98	3.99	4.14	3.83
SVN	4.45	4.38	4.31	4.08	3.94	3.94	3.86	3.66	3.48	3.44	3.26	3.15
ESP	3.04	3.13	2.96	2.86	2.85	2.78	2.84	2.77	2.64	2.67	2.66	2.53
SWE	4.45	4.52	4.41	4.19	3.7	3.9	3.91	3.91	3.73	3.44	3.49	3.24
CHE	2.01	2.01	2.05	1.88	1.81	1.72	1.71	1.67	1.69	1.65	1.53	1.48
GBR	2.94	2.98	2.88	2.63	2.59	2.5	2.41	2.34	2.22	2.28	2.2	2.04
RUS	8.37	8.15	7.78	7.74	7.74	7.96	7.96	8.23	8.06	8.16	8.46	8.48
ORT	4.29	4.20	4.14	3.95	3.80	3.77	3.74	3.66	3.51	3.49	3.45	3.24
ALB	2.83	2.51	2.89	2.86	2.62	2.61	2.64	2.53	2.45	2.34	2.27	2.06
ARM	4.07	4.16	3.92	4.12	4.12	3.93	3.86	3.51	3.52	4.01	3.91	3.92
AZE	4.2	4.47	4.28	4.3	4.26	4.35	4.38	4.34	4.62	4.7	4.73	4.4
BLR	7.05	7.24	6.39	6.4	6.07	6.18	6.14	6.29	5.97	5.82	6.18	6.18
BGR	5.8	5.5	5.12	5.32	5.36	5.07	5.11	4.97	4.72	4.68	4.72	4.72
GEO	3.75	3.68	3.99	4.08	4.18	4.2	4.04	3.82	3.83	3.98	3.86	3.64

**Tablo 4'ün devamı: Birincil Enerjinin Enerji Yoğunluğu Seviyesi (MJ/2017
PPP GSYH)**

KAZ	8.87	8.07	8.41	6.44	5.36	6.21	6.08	6.65	6.27	5.83	5.81	5.81
MDA	6.19	6.2	5.11	5.25	5.35	5.25	5.1	5.16	4.91	5.16	4.92	4.69
MNE	4.38	4.24	3.8	3.64	3.68	3.47	3.47	3.42	3.4	3.76	3.53	3.43
SRB	6.29	5.69	5.66	5.12	5.59	5.6	5.61	5.28	5.03	5.25	4.97	5.02
TUR	2.9	2.9	2.61	2.57	2.62	2.7	2.69	2.57	2.59	2.55	2.48	2.27
UZB	12.79	10.42	9.6	8.38	7.47	7.45	7.51	8.59	7.93	7.47	7.55	7.56
ORT	5.76	5.42	5.15	4.87	4.72	4.75	4.72	4.76	4.60	4.63	4.58	4.47

Tablo 4'e göre ülkelerin büyük bir kısmında enerji yoğunluğunun zamanla azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, enerji verimliliğinde iyileşmelerin yanı sıra ekonomik yapılarındaki değişimlerle de ilişkilendirilebilir. Örneğin, Danimarka, İrlanda ve İsviçre gibi yüksek gelirli ülkelerde enerji yoğunluğu 2011-2022 yılları arasında önemli ölçüde düşerken, Rusya ve Kazakistan gibi enerji yoğun sanayiye sahip ülkelerde bu düşüş daha sınırlı kalmıştır. Türkiye'nin enerji yoğunluğu 2011'de 2.90 iken 2022'de 2.27'ye gerileyerek enerji verimliliğinde olumlu bir eğilim sergilemiştir. Bununla birlikte, İzlanda gibi enerji kaynaklarına bağımlı ülkelerde enerji yoğunluğunun oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu veriler, enerji yoğunluğunun yalnızca ekonomik gelişmişlik düzeyiyle değil, aynı zamanda sanayi yapısı, enerji arz kaynakları ve teknolojik dönüşüm süreçleriyle de doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Genel olarak, verimlilik kavramı kaynakların kullanımını ve dolayısıyla bir girdi kümesini bir çıktı kümesine dönüştüren süreçlerin performansını karakterize etmek için kullanılır. Verimlilik kavramı, bir birimin performansının bir standartla karşılaştırıldığı anlamına geldiği için görecelidir. Her bir karar verme birimi (KVB) için verimlilik, çıktıların ağırlıklı toplamının girdilerin ağırlıklı toplamına oranı olarak tanımlanır. Bu bağlamda, verimliliğin ölçülmesi ve karşılaştırılması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri olan Veri Zarflama Analizi (VZA), birimlerin göreceli verimliliklerini değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan etkili bir tekniktir. Charnes vd., (1978), VZA yöntemini ilk kez önererek bu yöntemi örneklerin üretim verimliliğini değerlendirmek amacıyla kullanmışlardır. VZA'nın temel avantajı, benzer birimleri kıyaslarken herhangi bir öznel ağırlıklandırma prosedürü gerektirmemesi ve genel bir performans puanının verimlilik olarak türetilmesidir (Eğilmez ve McAvoy, 2013). VZA, birçok girdi ve çıktının analizine olanak tanıyan avantajları nedeniyle pek çok alanda geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Coelli, Rao, O'donnell ve Battese, 2005; Cook ve Zhu, 2006; Cook ve Seiford, 2009; Mavi, Fathi, Saen ve Mavi, 2019). VZA modelleri arasında yaygın olarak kullanılan iki varyasyon bulunmaktadır. Bunlardan ilki CCR (Charnes, Cooper ve Rhodes) yöntemi diğeri ise BCC (Banker, Charnes ve Cooper)

yöntemidir. Bu modeller arasındaki temel fark, CCR VZA modelinin sabit ölçekli verim (CRS- Constant Returns to Scale) varsayımına dayanması, BCC VZA modelinin ise değişken ölçekli verim (VRS- Variable Returns to Scale) analiz etmesidir. Gerçekte, ülkelerin daha yüksek çıktı üretimini sağlayan yeni teknolojileri benimsemeye yönelik doğal eğilimleri göz önüne alındığında, üretimin uzun vadede sabit getiriye dayalı olduğu varsayımı (CRS) tartışmalıdır. Zaman içinde ölçek ekonomilerinden yararlanan ülkeler, artan ölçek getirisini (IRS-Increasing Returns to Scale) deneyimleme eğilimindedir. Ancak, bu büyüme belirli bir noktadan sonra üretkenliği olumsuz yönde etkileyen faktörlerin devreye girmesiyle sınırlandırılabilir. Bu durum, ölçeğe göre azalan getirilerin (DRS-Decreasing Returns to Scale) ortaya çıkmasına neden olur. Dolayısıyla, üretim süreçlerinde yalnızca sabit getirilerle değil, aynı zamanda dinamik ve değişken ölçek etkileriyle de karşılaşılması olasıdır. Bu bağlamda, teknolojik gelişmeler ve ölçek etkileri arasındaki etkileşimler, uzun dönemde ekonomik büyüme ve verimlilik analizlerinde dikkate alınması gereken kritik unsurlardır.

Veri Zarflama Analizi (VZA) hem **girdi odaklı** hem de **çıkıtı odaklı** olarak uygulanabilir. Bu iki yaklaşım, performans değerlendirmesi yaparken modelin odaklandığı unsura göre ayrılır. Girdi odaklı modellerde amaç, aynı çıktıları minimum girdilerle üretmeye devam etmek, çıkıtı odaklı modellerde amaç, minimum miktarda girdi kullanarak çıktıları maksimize etmektir (Fancello, Carta ve Serra, 2020).

Bu bağlamda, analizimiz değişken ölçek getirileri varsayımını temel alan BCC-O modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

VZA ve genel optimizasyon problemleri için yaygın olarak kullanılan üç temel varsayım şunlardır:

- Doğrusallık (linearity),
- Negatif olmama (non-negativity)
- Konveksite kısıtı (convexity constraint).

Bu varsayımlar, optimizasyon modellerinin çözümünde önemli rol oynar ve etkinlik analizlerinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için gereklidir. Doğrusallık kısıtı, girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu varsayar. Negatif olmama durumunda tüm karar değişkenleri (girdiler, çıktılar, ağırlıklar) negatif olamaz ve konveksite kısıtında ise, karar birimlerinin etkin sınırdaki yer alması sağlanır. Konveksite kısıtı değişken ölçek getirileri (VRS) varsayımını kullanan BCC modeli için geçerlidir. Bu model, ölçek ekonomilerinin etkisini dikkate alarak, her bir karar biriminin (DMU) saf teknik etkinliğini ölçer. BCC-O modeli, çıkıtı yönelimli (output-oriented) bir modeldir ve hedefi, mevcut girdilerle çıktıyı en üst

düzeye çıkarmaktır. BCC-O modeli, aşağıdaki doğrusal programlama probleminin hesaplanmasıyla elde edilebilir:

$$\max \theta_i \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^C \lambda_i X_{i,n} \leq X_{0,n} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^C \lambda_i y_i^D \geq \theta_i y_0^D \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^C \lambda_i y_i^* \geq \theta_i y_0^* \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^C \lambda_i = 1 \quad (5)$$

$$X_{i,n}, y_i^D, y_i^* \geq 0, \lambda_i \geq 0 \quad (6)$$

$$\theta_i = (\sum_{i=1}^C \lambda_i y_i^D + \sum_{i=1}^C \lambda_i y_i^*) / \sum_{i=1}^C \lambda_i X_{i,n} \quad (7)$$

KVB'ler ($i = 1, \dots, C$) analize konu olan ülkeleri temsil etmektedir. KVB'ler, N girdisinden oluşan $x = (x_1, \dots, x_n) \in R_+^N$ kümesini kullanarak, istenen bir çıktı $y^D \in R_+$ ve istenmeyen bir çıktı $y^U \in R_+$ üretmektedir. λ_i , örneklenen ülkelerin doğrusal kombinasyonu için yoğunluk ağırlıklarını temsil etmektedir. θ_i , etkinlik skorudur.

KVB'ler istenen ve istenmeyen çıktılarla ilgili zıt tercihlere sahip oldukları göz önüne alındığında—yani, GSYH pozitif katkı sağlayan bir çıktı değişkeni olarak hedeflenirken, CO₂ emisyonunun minimize edilmesi gereken istenmeyen bir çıktı olarak modellenmesi —bu durumu DEA-BCC modeli içinde ele almak gerekmektedir. Mevcut çalışmada, doğrusal monoton azalan bir dönüşüm uygulanmaktadır (Seiford ve Zhu, 2002). Bu yaklaşım istenmeyen çıktı y^U istenen bir çıktı y^* dönüştürmek çeviri vektörünün kullanılmasını önermektedir. Dönüşümün ifadesi aşağıdadır.

$$y^* = -y^U + v > 0, \quad v = \max(y_i^U) + \min(y_i^U) \quad (8)$$

Bu formülasyon, istenmeyen çıktısı en yüksek olan karar biriminin (KVB), dönüşümden sonra en düşük değere sahip olacağı anlamına gelir. Temelde, istenmeyen çıktının maksimum değerinin eklenmesi, dönüştürülmüş değerlerin negatif olmamasını garanti eder ve minimum değer eklenmesi ise bu değer en düşük seviyede olmasını sağlar (Simeonovski, 2021).

4. Bulgular

İstenmeyen çıktı olan CO₂ değişkeni için dönüşüm yapılmış ve etkinlik skorları Tablo 5.'te sunulmuştur.

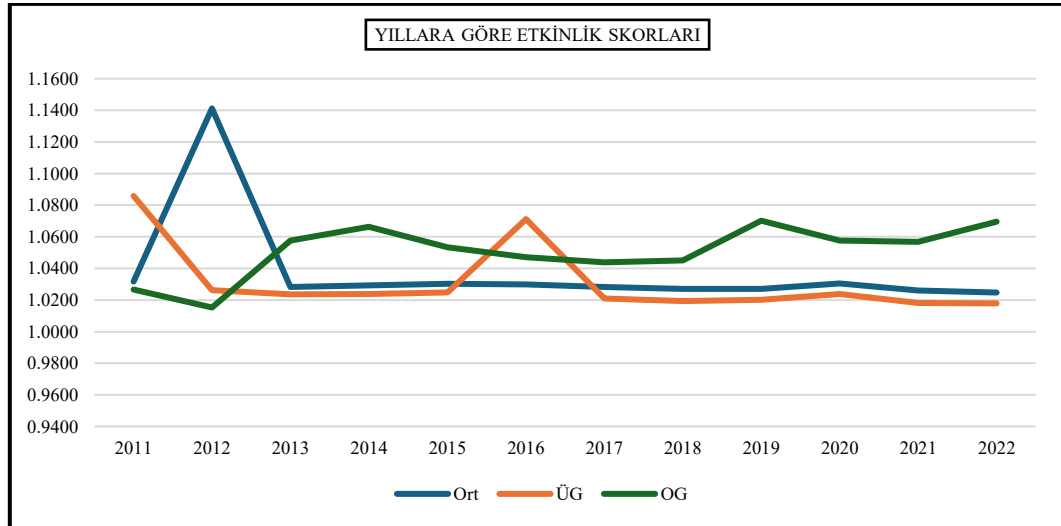
Tablo 5: Avrupa ve Orta Asya Ülkeleri Geneline Etkinlik Skorları

Ülkeler	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
AUT	3.07	3.04	3.08	2.95	2.99	2.96	2.95	2.8	2.81	2.84	2.86	2.55
BEL	4.39	4.17	4.33	4.02	3.93	4.11	4.02	3.8	3.83	3.71	3.86	3.4
HRV	3.63	3.5	3.44	3.29	3.35	3.26	3.26	3.08	3.01	3.16	2.91	2.75
CYP	3.14	3.06	2.83	2.95	2.92	2.92	2.85	2.7	2.57	2.54	2.45	2.36
CZE	5.08	5.09	5.09	4.83	4.59	4.43	4.39	4.26	4.07	4.06	4.16	3.98
DNK	2.62	2.5	2.49	2.31	2.25	2.23	2.18	2.13	2.03	1.99	1.96	1.83
EST	6.43	5.74	6.27	5.79	4.97	5.98	5.49	5.21	4.22	3.92	3.73	4.12
FIN	5.83	5.71	5.67	5.81	5.5	5.54	5.34	5.37	5.19	5.07	5.15	4.82
FRA	3.84	3.83	3.82	3.63	3.65	3.54	3.46	3.37	3.26	3.18	3.23	2.83
DEU	3.26	3.27	3.32	3.11	3.08	3.02	2.95	2.85	2.76	2.69	2.7	2.47
GRC	3.34	3.57	3.22	3.17	3.19	3.13	3.15	3.01	2.91	2.85	2.71	2.58
HUN	4.3	4.15	3.94	3.77	3.85	3.81	3.81	3.61	3.46	3.56	3.48	3.12
ISL	15.65	15.11	15.07	14.77	13.47	11.93	12.12	12.68	12.25	12.92	12.33	11.93
IRL	2.22	2.22	2.19	1.97	1.65	1.7	1.51	1.41	1.33	1.21	1.09	0.97
ITA	2.75	2.72	2.67	2.52	2.6	2.54	2.54	2.47	2.43	2.47	2.51	2.3
LVA	3.91	3.79	3.65	3.58	3.39	3.3	3.31	3.35	3.16	3.08	3.1	2.88
LTU	3.88	3.78	3.44	3.33	3.3	3.29	3.3	3.22	3.06	3	2.94	2.59
LUX	2.97	2.87	2.7	2.53	2.41	2.27	2.29	2.34	2.31	2.02	1.98	1.71
NLD	3.65	3.7	3.62	3.37	3.38	3.37	3.3	3.16	3.03	3.05	2.95	2.53
NOR	3.81	3.96	4.14	3.75	3.31	3.6	3.74	3.65	3.43	3.44	3.43	3.21
POL	4.45	4.24	4.2	3.9	3.77	3.83	3.81	3.77	3.48	3.44	3.42	3.13
PRT	2.89	2.83	2.86	2.8	2.85	2.77	2.8	2.63	2.53	2.56	2.42	2.31
ROU	3.44	3.29	3	2.85	2.78	2.7	2.62	2.49	2.37	2.39	2.4	2.12
SVK	4.98	4.72	4.78	4.38	4.28	4.22	4.33	4.14	3.98	3.99	4.14	3.83
SVN	4.45	4.38	4.31	4.08	3.94	3.94	3.86	3.66	3.48	3.44	3.26	3.15
ESP	3.04	3.13	2.96	2.86	2.85	2.78	2.84	2.77	2.64	2.67	2.66	2.53
SWE	4.45	4.52	4.41	4.19	3.7	3.9	3.91	3.91	3.73	3.44	3.49	3.24
CHE	2.01	2.01	2.05	1.88	1.81	1.72	1.71	1.67	1.69	1.65	1.53	1.48
GBR	2.94	2.98	2.88	2.63	2.59	2.5	2.41	2.34	2.22	2.28	2.2	2.04
RUS	8.37	8.15	7.78	7.74	7.74	7.96	7.96	8.23	8.06	8.16	8.46	8.48
ORT	4.293	4.201	4.1403	3.9586	3.803	3.775	3.7403	3.6693	3.51	3.4926	3.4503	3.2413
ALB	2.83	2.51	2.89	2.86	2.62	2.61	2.64	2.53	2.45	2.34	2.27	2.06
ARM	4.07	4.16	3.92	4.12	4.12	3.93	3.86	3.51	3.52	4.01	3.91	3.92
AZE	4.2	4.47	4.28	4.3	4.26	4.35	4.38	4.34	4.62	4.7	4.73	4.4
BLR	7.05	7.24	6.39	6.4	6.07	6.18	6.14	6.29	5.97	5.82	6.18	6.18
BGR	5.8	5.5	5.12	5.32	5.36	5.07	5.11	4.97	4.72	4.68	4.72	4.72

Tablo 5'in devamı: Avrupa ve Orta Asya Ülkeleri Geneline Etkinlik Skorları

GEO	3.75	3.68	3.99	4.08	4.18	4.2	4.04	3.82	3.83	3.98	3.86	3.64
KAZ	8.87	8.07	8.41	6.44	5.36	6.21	6.08	6.65	6.27	5.83	5.81	5.81
MDA	6.19	6.2	5.11	5.25	5.35	5.25	5.1	5.16	4.91	5.16	4.92	4.69
MNE	4.38	4.24	3.8	3.64	3.68	3.47	3.47	3.42	3.4	3.76	3.53	3.43
SRB	6.29	5.69	5.66	5.12	5.59	5.6	5.61	5.28	5.03	5.25	4.97	5.02
TUR	2.9	2.9	2.61	2.57	2.62	2.7	2.69	2.57	2.59	2.55	2.48	2.27
UZB	12.79	10.42	9.6	8.38	7.47	7.45	7.51	8.59	7.93	7.47	7.55	7.56
ORT	5.76	5.4233	5.1483	4.8733	4.7233	4.7516	4.7191	4.7608	4.6033	4.6291	4.5775	4.475

Tüm bölge üye devletleri için toplam ortalama verimlilik puanı 1,038'dir ve bu da %3,8'lik bir verimsizliği göstermektedir. Ancak ortalama olarak hesaplanan bu değere göre çıktı değişkenlerinin hangi oranda arttırılıp azaltacağını hesaplamak mümkün değildir. Verimlilik skorları her ülke için yıllara göre farklılaşmaktadır. Üst gelir grubuna dahil ülkeler için ortalama verimsizlik oranı %3,1 iken üst orta gelir grubuna dahil ülkeler için bu oran %5'tir. Ülke bazında skorlar incelendiğinde, yıllara göre etkin olan üst gelir grubunda altı ülke (Almanya, Yunanistan, İzlanda, Lüksemburg, İsviçre ve İngiltere) yer alırken, üst orta gelir grubunda bir ülke yer almaktadır (Karadağ). En verimsiz ülkeler -Rusya (%15) ve Türkiye (%19)'dir. Çalışma konusu olan ülkeler geneline 2011-2022 yılları arasında etkinlik skorları aşağıdaki grafikte verilmiştir.



Grafik 2: Yıllara Göre Etkinlik Skorları

Grafik incelendiğinde, 2022 yılındaki verimsizlik oranının (%2,4) 2011 yılındaki verimsizlik oranına (%3,1) kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bu

bulgu, zamanla verimsizlikte bir azalma yaşandığını ve süreçlerin iyileştirildiğini göstermektedir. Üst gelir ülke verilerine bakıldığında, 2011 yılındaki (%8,5) ortalama değer, 2022 yılında (%1,7) gerileyerek anlamlı bir iyileşme göstermektedir. Aynı gelişmeyi üst orta gelir grubuna dahil olan ülkeler için söylemek zordur. 2022 yılı, başlangıç yılı olan 2011 yılına göre ülke bazında değerlendirildiğinde üst gelir grubundan 12 ülkenin, üst orta gelir grubundan 3 ülkenin etkinlik skorlarında kötüleşme olduğu görülmektedir (Tablo 5).

5. Sonuç

Enerji verimliliği alanında genel geçer bir ölçüt bulunmaması, politika yapıcılar açısından kapsamlı verimsizlik analizlerine duyulan ihtiyacı daha da artırmaktadır. Bu bağlamda (VZA), üretim faktörlerini enerji ile ilgili değişkenlerle bir araya getirerek GSYH gibi arzu edilen çıktıları ve daha düşük CO₂ emisyonu gibi istenmeyen çıktıları dikkate alarak etkili bir değerlendirme olanağı sunmaktadır. Bu yaklaşım, enerji politikalarının şekillendirilmesinde kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır.

2011-2022 dönemini kapsayan analizler, Avrupa ve Orta Asya bölgesinde ortalama enerji verimsizliğinin %3,8 seviyesinde olduğunu ortaya koymaktadır. Üst gelir grubuna mensup ülkeler, ortalama %3,1'lik verimsizlik oranı ile enerji verimliliği açısından daha başarılı bir performans sergilerken, üst orta gelir grubundaki ülkelere bu oran %5 olarak kaydedilmiştir. Bu veriler, üst gelir grubundaki ülkelerin enerji verimliliği stratejilerini daha etkin bir şekilde uyguladıklarını, üst orta gelir grubundaki ülkelerin ise bu alanda daha fazla iyileştirme gereksinimi duyduklarını göstermektedir. Ayrıca, Almanya, Yunanistan, İzlanda, Lüksemburg, İsviçre, Birleşik Krallık ve Karadağ olmak üzere yedi ülke, her yıl hesaplanan VZA skorlarına göre enerji verimliliği açısından sürekli olarak başarılı bulunmuştur. Buna karşılık, Rusya (%15,6), Kazakistan (%11) ve Türkiye (%19) ortalama olarak verimlilik sınırından en uzak ülkeler arasında yer almaktadır. Bu bulgular, enerji verimliliği politikalarının ülkeler arasında farklılıklar gösterdiğini ve bu farkların gelir seviyesine göre değişebileceğini işaret etmektedir. Bulgular, gelir düzeylerine bağlı olarak enerji verimliliği politikalarının ülkeler arasında belirgin farklar gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Üst gelirli ülkelerde işgücü verimliliği (GSYH/L) tüm dönem boyunca ortalama 77.34 ABD dolarıdır. Lüksemburg, çalışan başına en yüksek ortalama GSYH'yi 233.45 ABD doları olarak kaydederken, çalışan başına en düşük ortalama GSYH, 24.23 ABD doları ile Rusya'da kaydedilmiştir. Üst orta gelirli ülkelerde ise işgücü verimliliği (GSYH/L) tüm dönem boyunca ortalama 13,87 ABD dolarıdır. Türkiye, çalışan başına en yüksek ortalama GSYH'yi 27.70 ABD doları olarak kaydederken, çalışan başına en düşük ortalama GSYH, 5.40 ABD doları ile Özbekistan'da kaydedilmiştir. Sermaye verimliliği açısından (GSYH/K) bakıldığında ortalama olarak üst geliri ülkelerin 4,88 ABD doları, üst orta gelirli ülkelerin ise 4.4 ABD doları GSYH üretmek için 1 ABD doları sermaye kullandığı görülmektedir.

Sermaye verimliliği açısından ülke grupları arasında önemli bir fark yoktur. Enerji yoğunluğunun bir ülkenin ekonomik üretim birimi başına ne kadar enerji tükettiğini gösteren önemli bir ölçüttür. Enerji yoğunluğunun daha düşük olduğu üst gelirli ülkeler (3.77 MJ/\$2017 PPP GSYH) genellikle daha verimli enerji kullanımına, ileri teknolojilere ve daha düşük enerji kayıplarına sahip olma eğilimindedir. Bu da daha az enerji ile daha fazla ekonomik çıktı elde edebildikleri anlamına gelir. Üst orta gelir grubundaki ülkelerde (4.87 MJ/\$2017 PPP GSYH) enerji yoğunluğunun daha yüksek olması, bu ülkelerin enerji verimliliğinde henüz düşük seviyelerde olduğunu göstermektedir. Dünya Bankası veri tabanından alınan verilere göre hesaplanan üretim başına CO₂ emisyon yoğunluğu üst gelirli ülkelerde ortalama 0.18 (kg per PPP \$ of GDP) iken üst orta gelirli ülkelerde bu oran 0.3 (kg per PPP \$ of GDP) olarak hesaplanmıştır. Üst gelirli ülkelerde üretim başına CO₂ emisyon yoğunluğunun daha düşük olması genellikle bu ülkelerin enerji verimliliği politikalarına, düşük karbonlu teknoloji kullanımına ve çevresel düzenlemelere daha fazla yatırım yapmış olma ihtimalinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu ülkelerdeki düşük emisyon yoğunluğu, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması ve karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik stratejilerin etkin bir şekilde uygulanmasıyla ilişkilendirilebilir. Ekonomik büyüme ile sürdürülebilir kalkınma hedefleri arasındaki dengeyi sağlamak için üst orta gelirli ülkelerde daha etkin enerji verimliliği politikalarına ve düşük karbonlu enerji teknolojilerine yönelik yatırımların artırılması gerektiği açıktır. Üst gelirli ülkeler, emisyon yoğunluğunu düşürmek için attıkları adımlarla, bu konuda bir model sunabilir. Bu fark, küresel düzeyde karbon nötrlüğü ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması için uluslararası iş birliğinin ve bilgi transferinin önemini de ortaya koymaktadır. Enerji verimliliğini artırmak için GSYH'nin sektör bileşiminde değişikliklere gidilmesi, enerji tasarrufu sağlayan ve teknolojik olarak gelişmiş endüstrilerin payının artırılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Avrupa ve Orta Asya bölgesinde enerji verimliliği farklılıkları VZA yöntemi ile analiz edilmiştir. Gelecekteki araştırmalar, enerji verimliliği ile ekonomik büyüme, yenilenebilir enerji kullanımı ve sanayi yapısındaki dönüşümler arasındaki ilişkiyi daha derinlemesine inceleyebilir. Ayrıca, ülkelerin enerji verimliliği politikalarının uzun vadeli etkilerini değerlendirmek için panel veri analizleri veya yapısal kırılmaları dikkate alan ekonometrik modellemeler kullanılabilir. Özellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde enerji verimliliği iyileştirme politikalarının uygulanabilirliği ve bu politikaların ekonomik ve çevresel etkileri üzerine çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanı sıra, sektör bazlı enerji verimliliği analizleri ile enerji yoğun sektörlerdeki dönüşüm süreçleri araştırılarak politika yapıcılara daha spesifik öneriler sunulabilir. Son olarak, küresel iklim değişikliği bağlamında enerji verimliliği ve karbon azaltımı stratejilerinin etkileşimini değerlendiren çalışmalara yer verilmesi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada önemli katkılar sağlayacaktır.

Kaynakça

- Ang, B. W. (2006). "Monitoring changes in economy-wide energy efficiency: From energy-GDP ratio to composite efficiency index". *Energy Policy*, 34(5), 574-582. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.11.011>
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2010). Renewable energy consumption and economic growth: Evidence from a panel of OECD countries. *Energy Policy*, 38(1), 656-660
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.06.013>
- Bennedsen, M., Hillebrand, E., ve Lykke, J. Z. (2024). Energy, economy, and emissions: A non-linear state space approach to projections. *arXiv preprint arXiv:2312.06600*.
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). "Measuring the efficiency of decision-making units". *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- Choi, Y., Zhang, N., & Zhou, P. (2012). "Efficiency and abatement costs of energy-related CO2 emissions in China: A slacks-based efficiency measure". *Applied Energy*, 98, 198-208. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.032>
- Coelli, T. J., Rao, D. S. P., O'donnell, C. J., ve Battese, G. E. (2005). "An introduction to efficiency and productivity analysis". *Springer Science & Business Media*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5493-6>
- Cook, W. D., Seiford, L. M. (2009). "Data envelopment analysis (DEA)–Thirty years on". *European Journal of Operational Research*, 192(1), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.01.032>
- Cook, W. D., & Zhu, J. (2006). "Modeling performance measurement: Applications and implementation issues in DEA". *Springer Science & Business Media*. <https://doi.org/10.1007/0-387-33183-7>
- Egilmez, G., & McAvoy, D. (2013). "Benchmarking road safety of US states: A DEA-based Malmquist productivity index approach". *Accident Analysis & Prevention*, 53, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.12.029>
- Fancello, G., Carta, M., & Serra, P. (2020). "Data envelopment analysis for the assessment of road safety in urban road networks: A comparative study

- using CCR and BCC models”. *Case Studies on Transport Policy*, 8(3), 736-744. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.04.001>
- Fong, W., Sun, Y., & Chen, Y. (2022). “Examining the relationship between energy consumption and unfavorable CO2 emissions on sustainable development by going through various violated factors and stochastic disturbance–Based on a three-stage SBM-DEA model”. *Energies*, 15(2), 569. <https://doi.org/10.3390/en15020569>
- González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., & Maestre, I. R. (2021). “A cross-country review on energy efficiency drivers”. *Applied Energy*, 289, 116681. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116681>
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377.
- Hu, J. L., & Wang, S. C. (2006). “Total-factor energy efficiency of regions in China”. *Energy Policy*, 34(17), 3206-3217. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.023>
- IEA (2021). Energy Efficiency 2021. International Energy Agency.
- IEA (2023). “International Energy Agency”. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dfd9134f-12eb-4045-9789-9d6ab8d9fbf4/EnergyEfficiency2023.pdf> (Erişim Tarihi:09.10.2024)
- Iqbal, W., Altalbe, A., Fatima, A., Ali, A., & Hou, Y. (2019). “A DEA approach for assessing the energy, environmental and economic performance of top 20 industrial countries”. *Processes*, 7(12), 902. <https://doi.org/10.3390/pr7120902>
- IPCC (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Khan, M., & Ozturk, I. (2021). “Examining the direct and indirect effects of financial development on CO2 emissions for 88 developing countries”. *Journal of Environmental Management*, 293, 112812. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112812>
- Kober, T., Schiffer, H. W., Densing, M., & Panos, E. (2020). “Global energy perspectives to 2060–WEC's world energy scenarios 2019”. *Energy Strategy Reviews*, 31, 100523. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100523>
- Lin, B., & Sai, R. (2022). “Sustainable transitioning in Africa: A historical evaluation of energy productivity changes and determinants”. *Energy*, 250, 123833. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123833>

- Mardani, A., Streimikiene, D., Cavallaro, F., Loganathan, N., & Khoshnoudi, M. (2019). "Carbon dioxide (CO₂) emissions and economic growth: A systematic review of two decades of research from 1995 to 2017". *Science of the Total Environment*, 649, 31-49. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.229>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.030>
- Mavi, R. K., Fathi, A., Saen, R. F., & Mavi, N. K. (2019). "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. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.002>
- Nikbakht, M., Hajiani, P., & Ghorbanpur, A. (2023). "Assessment of the total-factor energy efficiency and environmental performance of Persian Gulf countries: A two-stage analytical approach". *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 10560-10598. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24697-3>
- Peneder, M. (2003). "Industrial structure and aggregate growth". *Structural Change and Economic Dynamics*, 14(4), 427-448. [https://doi.org/10.1016/S0954-349X\(03\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0954-349X(03)00034-0)
- Peters, G. P., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Fuss, S., Jackson, R. B., Korsbakken, J. I., Nakicenovic, N. (2017). "Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement". *Nature Climate Change*, 7(2), 118-122. <https://doi.org/10.1038/nclimate3202>
- Rafiq, S., Salim, R., & Nielsen, I. (2016). "Urbanization, openness, emissions, and energy intensity: A study of increasingly urbanized emerging economies". *Energy Economics*, 56, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.02.009>
- Raupach, M. R., Marland, G., Ciais, P., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Klepper, G., & Field, C. B. (2007). "Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(24), 10288-10293. <https://doi.org/10.1073/pnas.0700609104>
- Raza, M. Y., & Lin, B. (2022). "Natural gas consumption, energy efficiency and low carbon transition in Pakistan". *Energy*, 240, 122497. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122497>

- Romer, P. M. (1990). Endogenous technological change. *Journal of Political Economy*, 98(5, Part 2), S71-S102.
- Seiford, L. M., & Zhu, J. (2002). "Modeling undesirable factors in efficiency evaluation". *European Journal of Operational Research*, 142(1), 16-20. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00293-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00293-4)
- Shen, X., & Lin, B. (2021). "Does industrial structure distortion impact the energy intensity in China?". *Sustainable Production and Consumption*, 25, 551-562. <https://doi.org/10.1016/j.spc>
- Shu, T., Liao, X., Yang, S., & Yu, T. (2024). "Towards sustainability: Evaluating energy efficiency with a super-efficiency SBM-DEA model across 168 economies". *Applied Energy*, 376, 124254.
- Simeonovski, K., Kaftandzieva, T., & Brock, G. (2021). "Energy efficiency management across EU countries: A DEA approach". *Energies*, 14(9), 2619.
- Solow, R. M. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94.
- Sorrell, S. (2009). "Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency". *Energy Policy*, 37(4), 1456-1469. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.12.003>
- Stern, D. I. (2011). The role of energy in economic growth. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219(1), 26-51.
- Stern, D. I. (2012). "Modeling international trends in energy efficiency". *Energy Economics*, 34(6), 2200-2208. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.03.009>
- Topcu, E., Altinoz, B., & Aslan, A. (2020). "Global evidence from the link between economic growth, natural resources, energy consumption, and gross capital formation". *Resources Policy*, 66, 101622.
- Wang, C. N., Nguyen, H. P., & Chang, C. W. (2021). "Environmental efficiency evaluation in the top Asian economies: An application of DEA". *Mathematics*, 9(8), 889.
- Wang, L. W., Le, K. D., & Nguyen, T. D. (2019). "Assessment of the energy efficiency improvement of twenty-five countries: A DEA approach". *Energies*, 12(8), 1535.

- Wang, X., Lu, Y., Chen, C., Yi, X., & Cui, H. (2024). "Total-factor energy efficiency of ten major global energy-consuming countries". *Journal of Environmental Sciences*, 137, 41-52.
- Wang, Z., Han, B., & Lu, M. (2016). "Measurement of energy rebound effect in households: Evidence from residential electricity consumption in Beijing, China". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 852-861.
- Wu, L., Chen, Y., Feylizadeh, M. R., & Liu, W. (2018). "Estimation of China's macro-carbon rebound effect: Method of integrating Data Envelopment Analysis production model and sequential Malmquist-Luenberger index". *Journal of Cleaner Production*, 198, 1431-1442.
- Wu, T. H., Chen, Y. S., Shang, W., & Wu, J. T. (2018). "Measuring energy use and CO2 emission performances for APEC economies". *Journal of Cleaner Production*, 183, 590-601.
- Yu, B. (2020). "Industrial structure, technological innovation, and total-factor energy efficiency in China". *Environmental Science and Pollution Research*, 27(8), 8371-8385.
- Zhang, Y. J., Peng, H. R., & Su, B. (2017). "Energy rebound effect in China's Industry: An aggregate and disaggregate analysis". *Energy Economics*, 61, 199-208.
- Zheng, Y., Xu, H., & Jia, R. (2022). Endogenous energy efficiency and rebound effect in the transportation sector: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 335, 130310.

Etik Beyanı: Yazar, bu çalışmanın tüm hazırlanma süreçlerinde etik kurallara uyulduğunu beyan etmektedir. Bilimsel etik konuları ile ilgili aksi bir durumun tespiti halinde tüm sorumluluk çalışmanın yazarlarına ait olup, Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi'nin hiçbir sorumluluğu bulunmamaktadır.

Evaluation of Energy Efficiency in European and Central Asian Countries Using Data Envelopment Analysis (DEA): An Analysis of Income Groups, Structural Change, and CO₂ Emission Intensity (2011-2022)

Extended Abstract

1. Introduction

The alignment of economic growth with sustainable development goals has garnered increasing attention, particularly regarding energy inputs and green GDP. Over the past 40 years, global primary energy consumption has surged from 270.5 EJ to 580 EJ, with approximately 85% of this energy sourced from fossil fuels—coal, oil, and natural gas (Kober et al., 2020). This heavy reliance on fossil fuels has resulted in heightened CO₂ emissions and other greenhouse gases, significantly contributing to climate change. Notably, carbon dioxide (CO₂) constitutes about 60% of total greenhouse gas emissions, making it a critical environmental pollutant (Khan & Öztürk, 2021). Therefore, effective energy efficiency management is crucial for achieving both environmental and economic sustainability. The efficiency of energy use, typically measured as the ratio of GDP to total energy consumption, plays a vital role in determining emissions (Raupach et al., 2007; Peters et al., 2017).

Energy efficiency is essential for reducing greenhouse gas emissions, especially within industrial sectors, and is considered one of the most cost-effective means to promote sustainable development. The 2023 Global Energy Efficiency Report by the International Energy Agency (IEA) highlights significant global trends, forecasting a decline in global energy intensity—from 2% in 2022 to 1.3% in 2023—primarily due to rising energy demand. This trend fails to meet long-term objectives, leading to international calls for a doubling of energy efficiency improvements by 2030. Global leaders are advocating for enhanced policy implementations toward these goals, which will be a focal point at the upcoming COP28 summit.

2. Method

Energy efficiency is often assessed through relative rather than absolute measures, utilizing three main groups of indicators: thermodynamic, physical, and economic (Ang, 2006). Structural changes, technological advancements, and various economic variables significantly influence energy efficiency. The “structural bonus hypothesis” suggests that changes in industrial structure can enhance energy efficiency by shifting energy use from low-efficiency sectors to higher-efficiency ones (Peneder, 2003). Empirical studies support the positive role of industrial restructuring, while technological progress may sometimes generate opposing effects through the energy rebound effect.

Given that energy is a crucial input and pollution an undesirable output in production processes, it is necessary to evaluate both energy efficiency and environmental performance within a total factor productivity framework. Total factor energy efficiency (TFEE) considers multiple inputs and outputs, including labor and capital, and provides a more comprehensive measure of energy efficiency (Hu & Wang, 2006). Data Envelopment Analysis (DEA), a non-parametric method, is widely used to assess total factor productivity under multiple input–output structures (Charnes et al., 1978).

This study applies the DEA model to evaluate energy efficiency in Europe and Central Asia from 2011 to 2022. Energy consumption is treated as an input, GDP as a desirable output, and CO₂ emissions as an undesirable output.

3. Findings

The findings reveal an average inefficiency of 3.8% in energy use across Europe and Central Asia. High-income countries exhibit lower inefficiency levels compared to upper-middle-income countries. Germany, Greece, Iceland, Luxembourg, Switzerland, the United Kingdom, and Montenegro demonstrate consistently high energy efficiency, while Russia and Türkiye rank among the least efficient. A temporal decline in inefficiency is observed from 2011 to 2022.

High-income countries also display higher labor productivity. Luxembourg records the highest GDP per worker, while Russia shows the lowest. Upper-middle-income countries present lower labor productivity levels, with Türkiye positioned at the upper end of this group. These findings indicate a close relationship between energy efficiency and labor productivity.

4. Conclusion, Discussion and Recommendations

The absence of a universally accepted measure of energy efficiency highlights the importance of comprehensive analytical frameworks. The DEA-based TFEE approach provides valuable insights by jointly considering energy consumption, economic output, and environmental emissions. The results underscore the role of income levels and structural characteristics in shaping energy efficiency outcomes.

Policy implications suggest that high-income countries benefit from more effective energy efficiency strategies and higher labor productivity, while upper-middle-income countries require targeted policies to address structural inefficiencies. Enhancing energy efficiency through sectoral transformation, technological innovation, and environmental regulation can contribute significantly to sustainable development goals. Future research may extend the analysis by incorporating dynamic efficiency measures or examining the role of institutional quality in energy performance.