



OECD Ülkelerinde Çevresel Sürdürülebilirlik ve Etkinliğin Çoklu Girdi ve İstenmeyen Çıktılar Çerçevesinde ME-DEA Yöntemiyle Analizi (2015–2020)

Tezcan Abasız¹Dilek Mütevellî²Hakan Bakkal³

¹ Sorumlu Yazar,

Prof. Dr.,
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi,
İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi,
İktisat Bölümü,
tezcan_abasiz@beun.edu.tr

² Öğr. Gör.

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi,
Zonguldak Meslek Yüksek Okulu,
Muhasebe ve Vergi Uygulamaları
Bölümü
dilek.mutevelli@beun.edu.tr

³ Dr.

Yalova Üniversitesi,
İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi,
İktisat Bölümü,
hakan.bakkal@yalova.edu.tr

Öz

Son yıllarda metodolojik önemi giderek artan Veri Zarflama Analizi (DEA), ülkeler arasındaki ekonomik, sosyal ve çevresel performansın değerlendirilmesinde yaygın biçimde kullanılmakta; politika yapımcılar ve karar alıcılara stratejik bilgiler sunarak çevre odaklı sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda daha etkili politikaların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda 38 OECD ülkesine ait 2015–2020 dönemini kapsayan yıllık veriler kullanılarak ekonomik, enerji ve çevresel sürdürülebilirlik etkinlik skorları arzu edilen ve arzu edilmeyen çıktılar bazında parametrik olmayan yöntemler çerçevesinde elde edilmiştir. Bulgulara göre enerji ve doğal kaynak açısından zengin ülkelerin enerji ve çevresel verimlilikte görece daha düşük performans sergiledikleri bu kaynakları her zaman etkin şekilde kullanamadıkları tespit edilmiştir. Bu bulgu, literatürde ifade edilen bolluk paradoksuna işaret etmektedir. Ayrıca sürdürülebilir büyümeyi desteklemek için enerji ve çevre politikalarının verimlilik odaklı bir yaklaşımla gözden geçirilmesi ve yeniden tasarlanması gerektiği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Veri Zarflama Analizi (DEA), OECD, Verimlilik, Girdi, Çıktı

Jel Kodları: C61, C67, Q43, Q51

Analysis of Environmental Sustainability and Efficiency in OECD Countries Using the ME-DEA Method within the Framework of Multiple Inputs and Undesirable Outputs (2015–2020)

Abstract

In recent years, Data Envelopment Analysis (DEA), whose methodological importance has increasingly grown, has been widely used to evaluate the economic, social, and environmental performance of countries. By providing strategic insights to policymakers and decision-makers, DEA contributes to the development of more effective policies in line with environment-oriented sustainable development goals. In this regard, using annual data for 38 OECD countries covering the 2015–2020 period, economic, energy, and environmental sustainability efficiency scores were obtained within the framework of non-parametric methods based on desirable and undesirable outputs. The findings reveal that countries rich in energy and natural resources exhibit relatively lower performance in terms of energy and environmental efficiency, indicating that these resources are not always utilized effectively. This result points to the resource abundance paradox emphasized in the literature. Furthermore, it is concluded that energy and environmental policies should be reviewed and redesigned through an efficiency-oriented approach in order to support sustainable growth.

Keywords: Data Envelopment Analysis (DEA), OECD, Productivity, Input, Output

Jel Codes: C61, C67, Q43, Q51

Bu makale Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.

This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International License



Atıf/Cite as: Abasız, T., Mütevellî, D. & Bakkal, H. (2026). OECD ülkelerinde çevresel sürdürülebilirlik ve etkinliğin çoklu girdi ve istenmeyen çıktılar çerçevesinde ME-DEA yöntemiyle analizi (2015–2020). *Karadeniz Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 7(1), 15-26.

GİRİŞ

Çevresel sürdürülebilirlik, çevresel, ekonomik ve enerji boyutlarıyla ulusal ve uluslararası ölçekte stratejik bir öneme sahiptir. Çevre ve enerji verimliliği, doğal kaynakların korunması ve iklim değişikliğiyle mücadele açısından da kritik bir rol oynar. Ülkeler zararlı emisyonlarını azaltarak ulusal ve uluslararası iklim hedeflerine katkıda bulunmak amacıyla Çevre ve enerji verimliliği, doğal kaynakların korunmasına yönelik politikalar geliştirmektedirler. Ekonomik verimlilik konusunda özellikle ekonomik büyümeyi sürdürülebilir bir şekilde desteklemek için teknolojiye yatırım yapmaktadırlar ve yenilikçi çözümler geliştirmektedirler. Enerji verimliliği kıstasında enerji tüketimini azaltarak dışa bağımlılığı azaltmak ve enerji fiyatlarının volatilitasını kontrol altında tutmak hedeflemektedir. Ülkeler verimlilikler açısından birbirleriyle karşılaştırmalı analizler yaparak var olan en iyi uygulamaları benimsemekte ve başarılı politika örneklerinden yararlanmaktadır. Böylelikle her ülkenin kendi koşullarına göre sahip oldukları kaynaklar dikkate alınarak sorunlara uygun çözümler geliştirmesi teşvik edilmektedir.

Çevresel ve ekonomik verimlilikte öncelikli hedef doğal kaynakların korunması ve sürdürülebilirliğidir. Daha az enerji tüketimi, kirlenici emisyonu ve daha az atık üretimi çevresel kaynakların korunmasına yardımcı olmaktadır. İkincil hedef hava ve su kalitesine dikkat edilmesidir. Enerji verimliliğindeki artış, fosil yakıtlardan kaynaklanan hava ve su kirliliğinin azaltılmasına katkıda bulunabilir. Bir diğer önemli faktör ise iklim değişikliğidir. Daha düşük sera gazı emisyonları, iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir rol oynamaktadır. Çevresel verimlilik çevresel etkileri azaltarak ekosistemlerin ve biyoçeşitliliğin korunmasına, hava ve su kalitesinin artırılmasına yardımcı olacaktır (Han, 2023). Bu da insan sağlığına olumlu etkiler sağlar. Gelecek kuşaklar için doğal kaynakların kullanılabilirliğini sürdürmek verimlilikle ilgilidir (Güngör ve Felekoğlu, 2018).

Son yıllarda yenilenebilir enerji yatırımlarındaki artışa rağmen fosil kaynaklı enerji tüketimi ve fosil enerji kullanımının çevre üzerindeki olumsuz etkisi devam etmekte-

dir (El, 2025). Küresel sera gazı emisyonunun istenen düzeyde azalmaması iklim değişikliğiyle mücadele için gerekli önlemlerin alınmasını gün geçtikçe acil ve zorunlu hale getirmektedir (Pata&Balcılar, 2024). Enerji verimliliğinde hedeflenen düzeye ulaşılması ile sera gazı emisyonunun ana nedenlerinden olan petrol ve gazı olan talebi büyük oranda azaltacağı öngörülmektedir (IEA, 2024).

Çalışmada, 38 OECD ülkesinin ekonomik, enerji ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarına ilişkin etkinlik skorları hesaplanmıştır. Ekonomik büyümeyi teşvik ederken eş zamanlı olarak olumsuz çevresel etkileri minimize etmeyi hedefleyen politikalara destek olmak amacıyla; üretim sürecindeki girdilerin, elde edilen olumlu çıktıların ve negatif dışsallık oluşturan faktörlerin etkinlik değerleri, 2015–2020 dönemi için ayrı ayrı hesaplanmış ve görselleştirilmiştir. Kalkınma hedeflerinin 2015 yılında kabul edilmesi ve bu yönde ülkelerin politika uygulamaya başlamaları nedeniyle ilgili dönem analiz dönemi olarak seçilmiştir.

LİTERATÜR

Sürdürülebilir kalkınma ve yeterli enerji desteğinin sağlanabilmesi; ekonomik büyüme ve enerji tüketimindeki verimlilik hedefinin dengelenmesiyle sağlanabilmektedir. Aksi halde enerji verimliliğinin ele alınmaması çevrenin ve çevresel performansın zamanla daha da kötüleşmesine, toplum sağlığının bozulmasına, kaynakların dengesiz kullanımı, yetersizliği ve bozulmasına ayrıca enerji güvensizliğine sebep olmaktadır. Bu şartlarda uzun vadede ise ülkeler yavaş veya azalan ekonomik büyümeye maruz kalamaktadır. Çevresel performans ölçümü, çevre politikası analizi ve karar alma için analitik bir temel sağlar.

Ampirik modelde ekonomik (işgücü ve sermaye) ve çevresel (tatlı su ve enerji) girdilerin kullanımına bağlı olarak elde edilen bir arzu edilen çıktı (GSYİH) ile üretim sürecinde negatif dışsallık olarak ortaya çıkan üç arzu edilmeyen çıktı (CO₂, metan ve azot oksit emisyonları) ilişkisini dikkate alan literatür Tablo 1’de özetlenmiştir.

TABLO 1 Seçili Literatürden Örnekler

Yazarlar	Dönem	Ülke(ler)	Değişkenler			Yöntem	Sonuç-Bulgular
			Girdiler	Çıktılar			
				İstenen	İstenmeyen		
Lovell vd. (1995)	1970-1990	19 OECD Ülkesi	GSYİH, Enflasyon Oranı, İşsizlik Oranı, Ticaret Dengesi (İhracat/İthalat), Kişi Başına Karbon Emisyonu, Kişi Başına Nitrojen Emisyonu			Veri Zarflama Analizi (DEA)	Dört temel değişkende makroekonomik hedefte en başarılı İsviçre iken en az başarılı İspanya ve Portekiz'dir. Küresel Verimlilik Performans Sıralamasında Kanada ve İsviçre sıralamada ilk sıralarda yer alırken; dört sanayileşmiş Kuzey Avrupa Ülkesi ise (Danimarka, İngiltere, Belçika ve Hollanda) sıralamanın en altlara düşmektedir.
Zaim ve Taşkın (2000)	1980-1990	25 OECD Ülkesi	Toplam İstihdam Toplam Sermaye Stoğu	GSYİH	CO2	Verimlilik İndeksi-Veri Zarflama Analizi (DEA)	Çevresel verimlilik endeksinin oluşturulmasında üretim sınırı teknikleri uygulanmaktadır. Çevresel düzenlemelerinin sonucunda OECD açısından üretim kaybının toplam değeri 1980,1985 ve 1990 yıllarında toplam OECD GSYH'nın %3,7, % 4,8 ve % 3,5'tir. Üretim süreçleri sonucundaki dönüşüm sonucunda en ağır çevresel yük Japonya ve Fransa'dadır. Ton başına en yüksek CO ₂ 1980'de Türkiye, Portekiz, Meksika; 1985'te Japonya, İsveç ve Portekiz; 1990'da İsveç, Fransa ve İsviçre'dir.
Zofio ve Prieto (2001)	1990-1995	14 OECD Ülkesi	Toplam Sabit Sermaye Stoku, Toplam İstihdam	İmalat Üretimi	Endüstri Tarafından Yayılan Karbondioksit (CO ₂) Emisyonu	Çevresel Verimlilik İndeksi-Veri Zarflama Analizi (DEA)	OECD Ülkelerinde (14 ülke için) toplam imalat üretimi içinde karbondioksit (CO ₂) maliyeti 1990 yılında toplam maliyetin %5,26; 1995 yılında %7,57'sini oluşturmaktadır. Maliyetlerde %5'lik indirim sonucunda imalat üretiminde karbondioksit (CO ₂) maliyeti 1990 yılında %1,96; 1995 yılında %0,03'e düşmüştür.
Fare vd. (2004)	1990	17 OECD Ülkesi	İşgücü, Enerji tüketimi, Sermaye Stoğu	Gayrisafi Yurtiçi Hasıla	Karbondioksit (CO ₂) Emisyonu Nitrojen Oksit (NO _x) Emisyonu, Sülfür-Kükürt Dioksit Gazı (SO _x) Emisyonu	Çevresel Verimlilik İndeksi-Veri Zarflama Analizi (DEA)	En yüksek-iyi çevresel göstergeler Fransa ve İsveç'e aittir; en düşük göstergeler ise Batı Almanya ve Yunanistan'dır. Nükleer enerjiye bağımlılığı en yüksek ülkeler Fransa ve İsveç'tir.
Arcelus ve Arocena (2005)	1970-1990	14 OECD Ülkesi	Çalışan Sayısı, Gerçek Brüt Sermaye Stoğu	Reel GSYİH	Yakıt Yanmasından Kaynaklanan Karbondioksit (CO ₂) Emisyonu	Çevresel Verimlilik İndeksi-Veri Zarflama Analizi (DEA)	Analizde üretkenlik artışı ve kirliliği azaltmak için fizibilite çalışması yapılmaktadır. Çalışmada kullanılan hesaplama ve formülasyonlarla belirli bir istenen çıktıyı elde etmek için kirlilik seviyesini en aza indirme stratejisi yer almaktadır.
Zhou vd. (2006)	1998-2002	30 OECD Ülkesi	Toplam Birincil Enerji Arzı, Nüfus	GSYİH	CO ₂	(DEA)	Çevre düzenlemelerinin etkilerini tahminlemek ve ekonomik-çevresel performansı modellemek için DEA modeli kullanılmıştır. 1998-2000 yıllarında söz konusu ülkelerin çoğunluğunda ekonomik ve çevre açısından SBE ₁ verimlilik puanının söz konusu olmadığı görülmektedir.
Zhou vd. (2007)	1995-1997	26 OECD Ülkesi	İşgücü Birincil Enerji Tüketimi	Gayrisafi Yurtiçi Hasıla	Karbondioksit (CO ₂) Emisyonu, Sülfür-Kükürt Oksit (CO _x) Emisyonu, Nitrojen Oksit (NO _x) Emisyonu, Karbon monoksit (CO) Emisyonu	Radyal-Radyal Olmayan Çevresel Verimlilik İndeksi-Veri Zarflama Analizi (DEA)	Radyal olmayan veri zarflama analizinin radyal olan yönetime göre çevresel verimlilik performansı ölçümlerinde ayırt etme gücü daha yüksektir. Çalışmada çevresel performansın ölçümünde ağırlıklı olarak radyal olmayan yönetime yer verilmiştir. Teknolojik gelişmelerle birlikte çevreye olan duyarlılık da önemli hale gelmiştir. Söz konusu ülkelerde istenmeyen çıktıya karşı duyarlılık oldukça azdır.

Yazarlar	Dönem	Ülke(ler)	Değişkenler			Yöntem	Sonuç-Bulgular
			Girdiler	Çıktılar			
				İstenen	İstenmeyen		
Zhou vd. (2008)	2002	Sekiz Bölge OECD, Orta Av- rupa, Avrupa	Enerji Tüketimi	Gayrisafi Yurtiçi Hasıla	CO2	Veri Zarflama Analizi (DEA)	Ekonomi genelinde enerji verimliliğini ölçmek için üç indeks geliştiril- miştir. İlkinde enerji girdilerini belli bir sınıra kadar azaltmak; diğer iki- sinde enerji karışımı etkileri hesaplamak için radyal olmayan modeller yer almaktadır. Sonuçlara göre enerji dışı girdiler, karbondioksit emis- yonu ve GSYH miktarını arttırmadan enerji tüketimini azaltmada Ka- nada ve Japonya en büyük potansiyele sahiptir.
Camarero, Cas- tillo, Picazo-Ta- deo, and Tama- rit (2008)	1971-2002	22 OECD Ülkesi	Gerçek Devlet ve Özel Net Sermaye Stoku (ko- nut sermayesi hariç), Toplam İstihdam	GSYİH	CO2	Verimlilik İndeksi- Veri Zarflama Analizi (DEA)	Portekiz, Yunanistan, ABD ve Avustralya da çevresel performans zayıf formda bulunmuştur. Referans ülke olarak İsviçre ele alındığında ülke- ler grubundan ayrı olarak ülkeler çevresel performans farkını kapat- maktadır.
Tone ve Tsutsui (2011)	1996-2000	ABD	Toplam Üretim Kapasi- tesi, Yakıt Tüketimi	Fosil Olmayan Enerji Üre- timi, Fosil Olan Enerji Üretimi	Sülfür-Kükürt Dioksit Gazı (SO ₂) Emisyonu, Nitrojen Oksit (NO _x) Emisyonu	DEA	ABD'deki 30 şirketin elektrik hizmetinin performansı kapsamında yapı- tığı çalışmalarda 1996'dan 2000'e çevresel verimlilikte %16'lık bir iyi- leşme tespit edilmiştir.
Lu vd. (2013)	2005-2007	32 OECD Ülkesi	Endüstri, Nüfus	GSYİH	Fosil Yakıt Karbondiok- sit (CO ₂) Emisyonu	Fosil Yakıt Kar- bondioksit (CO ₂) Emisyonu	Analizde karbondioksit emisyonlarının yıllar içerisinde verimlilik sırala- masında değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Yaklaşık olarak tüm Avrupa ülkeleri verimli kategoride yer alırken; Japonya ilgili tarih aralı- ğında puanı 1'e yakın verimlilik kriterinde yer alan tek Asya ülkesidir. Yeni Zelanda ve Almanya bu süreçte daha verimli hale gelmiş puan sı- ralamasında daha iyimser konumda bulunmuştur. İncelenen dönem aralığını izleyen yıllarda ise OECD ülkelerinin karbondioksit emisyonla- rını %6,66-%7,49 oranında azaltmaları gerektiği öngörülmüştür
Camarero, Cas- tillo, Picazo-Ta- deo, and Tama- rit (2013)	1980-2005	22 OECD Ülkesi	Reel GSYH Karbondioksit (CO ₂) Emisyonu Sülfür-Kükürt Oksit (CO _x) Emisyonu Nitrojen Oksit (NO _x) Emisyonu			Çevresel Verimlilik İndeksi-Veri Zarf- lama Analizi	Çevresel verimlilikte en büyük ilerleme İsveç, Danimarka, Fransa, İz- landa ve Almanya'da görülmektedir. Hem eko-verimli ülkeler hem de kötü performans gösteren ülkeler aynı zamanda kulüp kurma eğilim- dedirler.
Simsek (2014)	1995-2009	23 OECD Ülkesi	İşgücü, Gerçek Sermaye Stoğu Enerji Tüketimi (Petrol ve Doğalgaz Tüketimi, Hidroelektrik ve Nükleer Tüketimi, Kömür Tüke- timi)	GSYİH	CO2	Verimlilik İndeksi- Veri Zarflama Analizi (DEA)	Çalışmada enerji verimlilikleri-verimsizliklerini tahmin etmek için enerji girdisi üç farklı şekilde değişken olarak kullanılmıştır. Petrol ve doğa- gaz tüketimi birinci girdi, hidroelektrik ve nükleer ikinci girdi, kömür ise üçüncü bir girdi olarak modele dahil edilmiştir.1995-2009 yılları arasında ABD, Birleşik Krallık, Japonya, İrlanda, İsviçre, Norveç her yıl enerji açısından verimli ülkeler kıstasında yer alırken; Meksika ve İtalya analize dahil edilen yılların başlangıcı için verimli görülmüş; Po- lonya ve İsveç ise araştırma döneminin sonunda verimli bulunmuştur.

Yazarlar	Dönem	Ülke(ler)	Değişkenler			Yöntem	Sonuç-Bulgular
			Girdiler	Çıktılar			
				İstenen	İstenmeyen		
Apergis vd. (2015)	1985-2011	20 OECD Ülkesi	Çalışan Sayısı, Yenilenebilir Enerji Tüketimi, Yenilenemeyen Enerji Tüketimi, Gerçek Üretken Sermaye Stoğu	Reel GSYH	Karbondioksit (CO ₂) Emisyonu	Çevresel Verimlilik İndeksi-Veri Zarflama Analizi (DEA)	Analizde verimlilik seviyelerinin yüksekliğinin yanı sıra zamanla azalmış olduğu da tespit edilmiştir. Sermaye yoğun ülkelerde enerji verimliliği emek yoğun ülkelere göre daha yüksektir. Enerji verimliliğinin enerji tasarrufu, maliyet minimizasyonu ve karbondioksit (CO ₂) emisyonunu azalttığı varsayıldığında enerji verimliliğini arttırabilecek politikalara ihtiyaç duyulmaktadır.
Rashidi vd. (2015)	2007	OECD	Kömür Tüketimi, Petrol Tüketimi	Reel GSYH	Karbondioksit (CO ₂) Emisyonu	Çevresel Verimlilik İndeksi-Veri Zarflama Analizi (DEA)	Çalışmanın sonucuna göre eko-verimli ülkeler olarak kabul edilen ülkeler; Fransa, Almanya, Lüksemburg, Norveç, İsveç ve Birleşik Krallık'tır. Güney Kore en yüksek, İtalya ise en düşük enerji tasarrufu potansiyeline sahiptir.
Woo (2015)	2004-2011	OECD	İşgücü, Sermaye, Yenilenebilir Enerji Arzı	Gayrisafi Yurtiçi Hasıla	Karbon Emisyonu	DEA	Çalışmaya göre en yüksek çevresel verimliliğe sahip ülkeler; OECD Avrupa Ülkeleridir. İncelenen üç OECD alanı (Avrupa-Asya-Amerika) arasında en yüksek ortalama verimliliğe sahip OECD Amerika bölgesidir. OECD Avrupa ülkeleri, yenilenebilir enerjiyle ilgili kapasite farkı nedeniyle tüm OECD üyeleri arasında nispeten yüksek bir standart sarmaya sahiptir.
Rashidi ve Saen (2015)	2012	19 OECD Ülkesi	İşgücü, Yağış Ortalaması, Enerji Kullanımı,	Enerji Kullanım Birimi Başına Düşen GSYH	Yakıt Yanmasından Kaynaklanan Karbondioksit (CO ₂) Emisyonu	Çevresel Verimlilik İndeksi-Veri Zarflama Analizi (DEA)	Enerji tüketimi ile istenmeyen çıktılar arasındaki katsayı hem yüksek hem de pozitif çıkmıştır. Buna enerji girdilerinin kullanım miktarı arttıkça istenmeyen çıktı da artmaktadır.

VERİ SETİ VE METODOLOJİ

Veri zarflama analizi (Data Envelopment Analysis-DEA) ölçek ekonomisi ve etkinlik analizlerinde kullanılan parametrik olmayan bir yöntemdir (Lorcu, 2008: 27; Cooper, Seiford, Tone, ve Zhu, 2007). Doğrusal bir programlama yöntemi olarak, birden fazla girdi ve çıktıya sahip ekonomik birimler (genellikle işletmeler, ülkeler) analiz edilmektedir. Ekonomik birimlerin sahip olduğu çıktıları (outputs) ne kadar etkin bir şekilde sağladıklarını değerlendirmek için kullanılır (Özkan ve Özcan, 2018). DEA'nın temel amacı, aynı türdeki karar birimleri arasında karşılaştırmalar yaparak en iyi uygulamaları yani verimlilik skorlarını belirlemektir. Bu yöntem, her bir birimin belirli girdi (inputs) miktarıyla ne kadar çıktı sağladığını analiz etmekte ve verimliliklerini ölçmektedir (Wei, 2001; Mehdiloozad, Sahoo ve Roshdi, 2014; Yaşar ve Akın, 2023). Analizde birimler arasında etkinlik kıyaslaması yapılabilmesi için her birim adına bir "etkinlik sınırı" oluşturulması gerekmektedir. Belli bir çıktıyı en az kaynakla üreten ya da en az girdi ile maksimum çıktı üretme kapasitesine sahip birimler karşılaştırılmaktadır. Etkinlik kabulü mevcut girdi miktarıyla (örneğin iş gücü, sermaye, malzeme) daha fazla çıktı (ürün, gelir veya hizmet) üretebilen birimler için söz konusudur. DEA modelinde kıyaslamalar için veri zarfları oluşturulur. Veri zarfları, her bir birimin diğer birimlere göre ne kadar etkin olduğunu gösteren bir grafik veya matematiksel modeldir. Referans teknoloji sınırları, DEA modelinde hangi birimlerin diğerlerine göre daha etkin olduğunu gösterir. Bu sınırlar, performansı yüksek olan birimleri belirlemek için kullanılmaktadır (Mehdiloozad, Sahoo, Roshdi, 2014). DEA, yöntem olarak Farrell (1957) tarafından ortaya çıkarılmış daha sonra Charnes vd. ile Banker vd. tarafından geliştirilmiştir (Farrell, 1975). Bir birimin optimal ölçeği kullanıp kullanmadığını veya daha büyük veya daha küçük bir ölçeğe daha verimli olup olamayacağı da değerlendirilmektedir (Seiford ve Thrall, 1990). Ayrıca karar verme birimlerinin etkin olma-olmama skorları için yapılan puanlamada 0 ve 1 ölçütü dikkate alınmaktadır (Batı vd., 2024).

CCR (Charnes, Cooper, Rhodes) modeli, DEA'nın en çok kullanılan modellerinden biridir. Temel bir formülasyon içeriğine sahiptir. DEA'nın bu modeli, Charnes, Cooper ve Rhodes tarafından 1978 yılında geliştirilmiştir. Ekonomik birimlerin etkinliğini maksimize etmeyi amaçlamaktadır. Çoklu girdi ve çıktıları kullanarak her bir birimin etkinliğini değerlendirmektedir (Charnes, Cooper, Rhodes, 1978). Bu modelde bazı temel varsayımlar söz konusudur. Bunlar: birimlerin (genellikle işletmelerin veya karar birimlerinin) belirli miktarda girdi ile belirli miktarda çıktı ürettiği kabul edilir. Tüm birimler aynı girdi ve çıktı türle-

rine sahiptir. İdeal olan, daha fazla çıktı üreten veya daha az girdi kullanan birimlerin daha etkin olduğudur. CCR modelinde etkinlik hem teknik hem de ölçek verimliliği açısından gerçekleştirilmelidir (Özkan ve Özcan, 2018; Batı vd., 2024).

BBC (Banker, Charnes, Cooper) modeli, veri zarflama analizi (DEA) içinde bir diğer önemli bir modeldir. BBC modeli, orijinal DEA modelinin daha geniş bir formülasyonudur. Banker, Charnes ve Cooper tarafından 1984 yılında yayınlanmıştır. Bu model, çoklu girdi ve çıktılar arasında karar verme birimlerinin (DMU) performans ölçümünü yapmaktadır (Banker, Charnes ve Cooper, 1984). BBC modeli, aynı zamanda CCR modelinde olduğu gibi etkinliği değerlemede kullanılır.

BBC, CCR modeli ve genel olarak DEA, çeşitli disiplinlerde ve alanlarda kullanılır: İşletme ve endüstri mühendisliği alanında işletmelerin üretim süreçlerinin etkinliğini değerlendirme ve iyileştirme, kaynak kullanımını optimize etme; finans alanında bankaların, finansal kurumların ve yatırım portföylerinin performansını değerlendirme ve risk yönetimi, sigorta, menkul kıymetler ve risk yönetimi; sağlık hizmetleri alanında hastaneler, klinikler ve sağlık hizmeti sağlayıcılarının verimliliğini değerlendirme ve artırma; eğitim alanında okulların, üniversitelerin ve eğitim kurumlarının performansını değerlendirme ve kaynak yönetimi, öğrenci başarısını artırmak için kaynaklarını nasıl daha etkin kullanabileceğini analiz etme, kamu politikaları alanında kamu hizmetlerinin etkinliğini ve verimliliğini artırmak amacıyla kullanılır. Çevre ve kamu hizmetleri, enerji hizmetleri, lojistik, turizm, bilgi teknolojisi, telekomünikasyon, ulaştırma, ar-ge, dağıtım, görsel-işitsel, medya, eğlence, kültürel ve diğer ticari hizmetler de veri zarflama analizi disiplini altında incelenmektedir (Aksu ve Gencer, 2018). Hem kamu hem özel sektörde hizmetlerin verimliliğini ve üretkenliğini ölçmek için yaygın olarak uygulandığını gösteren kanıtlara odaklanmaktadır (Emrouznejad ve Cabanda, 2015). CCR modeli ölçeğe göre sabit getirili; BBC modeli ise ölçeğe göre değişken getirili üretim teknolojisini dikkate almaktadır (Yaşar ve Akın, 2023; Sherman ve Zhu, 2006; Seyhan, 2023; Özkan ve Özcan, 2018).

$$P_{DEA}^{ME}(x) = \left\{ (y^D, y^U) \in R_+^{p+q} \mid \begin{cases} \prod_{j \in J} x_{ij}^{\lambda_j} \leq x_i, & i = 1, \dots, m, \\ \prod_{j \in J} y_{rj}^{\theta_j \lambda_j} \geq y_r^D, & r = 1, \dots, p, \\ \prod_{j \in J} y_{tj}^{\theta_j \lambda_j} = y_t^U, & t = 1, \dots, q, \\ \sum_{j \in J} \lambda_j = 1, \\ \lambda_j \geq 0, 0 \leq \theta_j \leq 1, & j = 1, \dots, n \end{cases} \right\} \quad (1)$$

$$\log T_{DEA}^{ME} := \left\{ (\log x, \log y^D, \log y^U) \mid (x, y^D, y^U) \in T_{DEA}^{ME} \right\} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho_O^{ME} = \text{Max} & \left(\prod_{i=1}^m \alpha_i^{u_i} \right) x \left(\prod_{r=1}^p \beta_r^{v_r} \right) y \left(\prod_{t=1}^q \gamma_t^{w_t} \right) \\ \text{s.t.} & \prod_{j \in J} x_{ij}^{\lambda_j} \leq \alpha_i^{-1} x_{io}, \quad i = 1, \dots, m, \\ & \prod_{j \in J} y_{rj}^{D \theta_j \lambda_j} \geq \beta_r y_{ro}^D, \quad r = 1, \dots, p, \\ & \prod_{j \in J} y_{tj}^{U \theta_j \lambda_j} = \gamma_t^{-1} y_{to}^U, \quad t = 1, \dots, q, \\ & \sum_{j \in J} \lambda_j = 1, \\ & \lambda_j \geq 0, 0 \leq \theta_j \leq 1, \alpha_j \geq 1, \beta_r \geq 1, \gamma_t \geq 1, \forall i, r, t, j, \end{aligned} \quad (3)$$

Model (3), doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi taşıması nedeniyle Kuosmanen (2005) dönüşümüyle doğrusal sınır noktalarına getirilir. Bu amaçla logaritmik dönüşüm kullanılarak katsayılar doğrusal hale getirilip

konkavlık problemi ortadan kaldırılmış ve Model 4'te yer alan optimizasyonda matematiksel olarak gösterimi yapılmıştır.

$$\begin{aligned} \log \rho_o^{ME} = \text{Max} & \sum_{i=1}^m u_i \log \alpha_i + \sum_{r=1}^p v_r \log \beta_r + \sum_{t=1}^q w_t \log \gamma_t \\ \text{s.t.} & \sum_{j \in J} (\mu_j + \eta_j) \log x_{ij} \leq \log x_{io} - \log \alpha_i, \quad i = 1, \dots, m, \\ & \sum_{j \in J} \mu_j \log y_{rj}^D \geq \log y_{ro}^D + \log \beta_r, \quad r = 1, \dots, p, \\ & \sum_{j \in J} \mu_j \log y_{tj}^U = \log y_{to}^U - \log \gamma_t, \quad t = 1, \dots, q, \\ & \sum_{j \in J} (\mu_j + \eta_j) = 1, \\ & \mu_j \geq 0, \eta_j \geq 0, \log \alpha_i \geq 0, \log \beta_r \geq 0, \log \gamma_t \geq 0, \forall i, r, t, j. \end{aligned} \quad (4)$$

Veri setinin tanıtılması

OECD ülkeleri arasındaki çevresel, ekonomik ve enerji verimliliği performansları karşılaştırmasında analizde kullanılan değişkenler Tablo 2'de verilmiştir.

TABLO 2 Çalışma Değişkenleri

GİRDİLER		
Değişken	Değişken Birimi	Veri Kaynağı
Toplam İşgücü	(15+64)	World Bank, 2024
Tatlı Su Çekilimi (Çevre Etkisi)	(Milyon m3)	World Bank, 2024
Sabit Sermaye Yatırımları	2005 Sabit Fiyatlarla (PPP Dolar) 2017 Fiyatları baz alınarak dönüşümü yapılmıştır	World Bank, 2024
Enerji Tüketimi	(quad Btu cinsinden)	U.S. Energy Information Administration, 2024
İSTENMEYEN ÇIKTILAR		
Değişken	Değişken Birimi	Veri Kaynağı
CO2 Emissions: Karbondioksit Emisyonu	(kt)	World Bank, 2024
Metan Gazı Emisyonu	(kt of CO2 cinsinden)	World Bank, 2024
Nitröz Oksit (Azot)	(bin metrik ton cinsinden)	World Bank, 2024
İSTENEN ÇIKTI		
Gayrisafi Yurtiçi Hasıla	(2017 Sabit Fiyatlarla (PPP Dolar))	World Bank, 2024

Çalışmada kullanılan girdiler şu şekilde tanımlanmaktadır: İşgücü, üretim sürecindeki insan kaynağından kaynaklanan faktör olarak tanımlanmıştır. Etkin bir şekilde yönetildiğinde, üretkenlik artışına katkı sağlamaktadır. Temiz su kaynakları, birçok endüstriyel süreçte ve tarımsal üretimde önemli bir girdidir. Temiz su kaynaklarının verimli kullanımı, su kirliliğini önlemeye yardımcı olmaktadır. Sermaye, üretimde kullanılan makine, teçhizat, bina gibi fiziksel varlıkları ifade eder. Sermaye etkin bir şekilde kullanıldığında, üretkenlik ve verimlilik artabilir. Enerji,

üretim süreçlerinde kullanılan kritik bir girdidir. Enerji kullanımı, fosil yakıtların kullanımıyla doğrudan ilişkili olduğundan, enerji verimliliği önemli bir konudur. Çıktılar kapsamında, istenen (arzu edilen) çıktı olarak Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GDP) ele alınmıştır. GDP, bir ülkenin ekonomik büyümesini ve refah düzeyini ölçen temel bir göstergedir. İstenmeyen (arzu edilmeyen) çıktılar ise CO2, metan (CH4) ve nitröz oksit (N2O) emisyonları olarak belirlenmiştir. Bu emisyonlar, endüstriyel faaliyetler ve enerji üretimi gibi süreçlerin yan ürünleri olup çevre üzerinde

önemli olumsuz etkilere yol açmaktadır ve negatif dışsalılık olarak değerlendirilmektedir.

Bulgular

Grafik 1'e göre 38 OECD ülkesinden 14'ü, 2015–2020 döneminde en az bir yılda birlik değerinin (1.000) altında kalan kısmı skorları nedeniyle orta derecede verimli olarak sınıflandırılmıştır. Buna karşılık 21 ülke tüm yıllarda süper verimli (1.000) bulunmuş, ayrıca bazı ülkeler belirli yıllarda bu gruplar arasında yer değiştirmiştir. Etkinlik skorları, dört girdi (işgücü, tatlı su, sermaye stoku, enerji) ve üç istenmeyen çıktı (CO₂, metan, azot oksit) için kısmi verimlilik skorlarını kapsamaktadır.

Genel verimlilik açısından ülkelerin çoğunda belirgin ve sürekli bir iyileşme görülmemektedir. İsrail ve İspanya'da ilgili analiz döneminde etkinlik skorları sürekli artışı dikkat çekerken, Danimarka yüksek seviyede kalmasına rağmen zaman içinde düşüş yaşamıştır. Söz konusu analizde, Avustralya, Avusturya, Belçika, Kanada, Şili, Finlandiya ve Norveç en düşük skorlara sahip olan ülkelerdir.

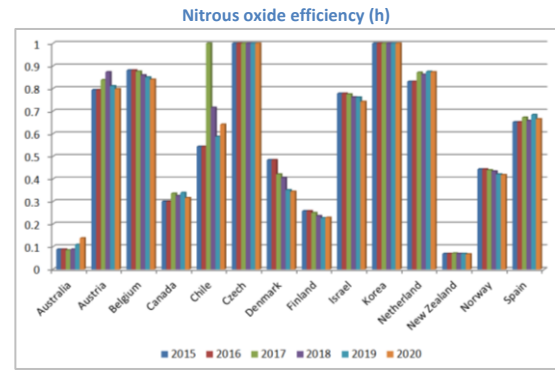
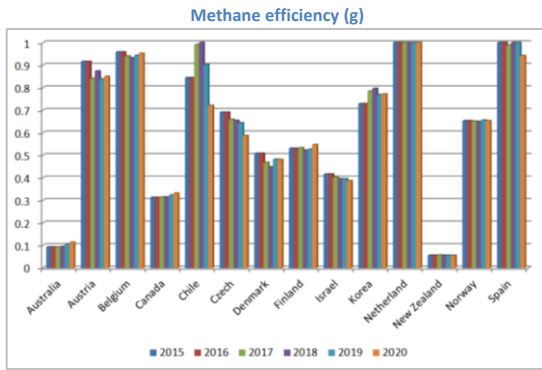
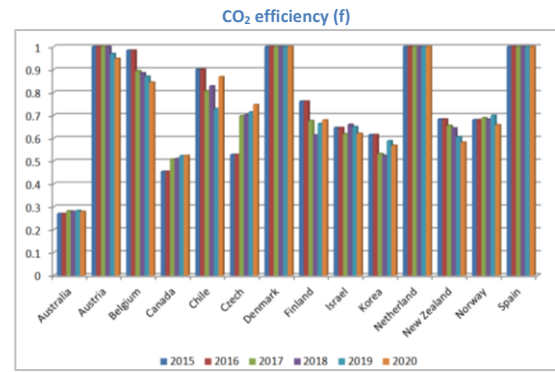
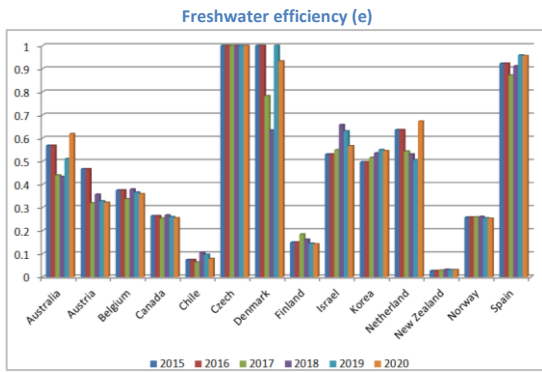
Girdi bazında bakıldığında, işgücü verimliliği birçok ülkede artmış; özellikle İsrail olumlu ayrılmıştır. Sermaye

girdisi diğer girdilere kıyasla en verimli unsur olup, çoğu ülkede birlik seviyesine yakındır; Norveç bu alanda en zayıf ülkedir. Enerji verimliliği ise genel olarak düşüktür ve birçok ülkede sıfıra yakın skorlar gözlenmiştir; yalnızca Danimarka, Yeni Zelanda ve İspanya bazı yıllarda görece daha iyi performans göstermiştir. Tatlı su verimliliği, su kaynakları açısından zengin ülkelerde genellikle daha düşük seviyelerde seyretmekte olup; Çek Cumhuriyeti, Danimarka, Hollanda ve İspanya bu alanda görece daha iyi performans sergilemişlerdir.

İstenmeyen çıktılar açısından, CO₂ verimliliği ülkeler arasında dalgalı bir seyir izlemiştir; Danimarka, Hollanda ve İspanya sürekli yüksek performans sergilemiştir. Metan emisyonlarında Hollanda ve İspanya daha verimli iken, Yeni Zelanda en düşük performansa sahiptir. Azot oksit (NO_x) verimliliği söz konusu olduğunda ise, Çek Cumhuriyeti ve Kore en yüksek performansı gösterirken; Avusturya ve Yeni Zelanda en düşük verimlilik seviyelerinde kalmıştır. Genel olarak bulgular, orta derecede verimli OECD ülkelerinde hem girdilerin kullanımında hem de çevresel çıktılarda yetersiz ve istikrarsız verimlilik kazanımlarına işaret etmektedir.

GRAFİK 1 2015-2020 Kısmi Verimlilik Skorları





Çok düşük metan kısmi verimliliğine sahip az sayıda bir ülke kümesi ortaya çıkmaktadır. Grafik (g)'de Avustralya, Kanada ve Yeni Zelanda için diğer ülkelere göre metan gazı emisyonunda daha az verimlilik söz konusu iken; Hollanda ve İspanya'da daha yüksek verimlilik vardır. Hollanda'nın metan emisyonu verimlilik puanı birlik seviyesinde iken; İspanya'nın ise 2020 yılında 2015 yılına göre birlik seviyesinde olan puanının azaldığı tespit edilmiştir. Metan gazı emisyonu söz konusu olduğunda en düşük verimlilik Yeni Zelanda da gerçekleşmiştir ve 2017 yılı hariç (çok az değişmiş) yıllar itibarı ile de Yeni Zelanda'nın puanında değişiklik olmamıştır. Norveç'in puanı yıllar içinde artış ve azalış yönünde dalgalı seyreitse de 2015 ve 2020 verimlilik puanları aynı kalmıştır. Avustralya, Kanada, Finlandiya ve Kore'de 2015 yılına göre 2020 yılı puanları yükselmekte; Avusturya, Belçika, Şili, Çek Cumhuriyeti, Danimarka, İsrail ve İspanya'da azalmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, 2015–2020 dönemi için OECD ülkelerinin ekonomik, enerji ve çevresel verimlilik performansları çarpımsal çevresel veri zarflama analizi (ME-DEA) yaklaşımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Girdilerin yanı sıra hem arzu edilen hem de arzu edilmeyen çıktıları bütünsel bir şekilde değerlendiren bu yöntem sayesinde, ülkelerin performansı yalnızca ekonomik büyüme açısından değil; çevresel sürdürülebilirlik ve enerji kullanım etkinliği bağlamlarında da kapsamlı ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Benzer şekilde, nitroz oksit (azot) için genel anlamda verimlilik kazanımlarına rağmen, hala birkaç ülke de kısmi düşük verimlilik görülmektedir. Grafik h incelendiğinde Avustralya, Kanada, Yeni Zelanda ve Finlandiya için verimlilik kaybı fazla; Çek Cumhuriyeti ve Kore'de daha fazla verimlilik vardır. Kanada ve Çek Cumhuriyeti'nde azot salınımlarında verimlilik için dikkat çeken her iki ülkede de puanların birlik seviyesinde olması ve yıllar içinde de aynı kaldığıdır. Hem 2015 hem de 2020 kısmi verimlilik puanı en yüksek iki ülke bu şartlar altında Kore ve Çek Cumhuriyeti için geçerli olmuştur. Başlangıç yılına göre kısmi verimliliği azot salınımı için artan ülkeler: Avustralya, Avusturya, Kanada, Şili, Hollanda, İspanya'dır; verimlilikte azalış yaşayanlar ise Belçika, Danimarka, İsrail, Yeni Zelanda ve Norveç olmuştur. 2015 ve 2020 yılında verimliliği en az olan ülkeler Avustralya ve Yeni Zelanda'dır.

OECD ülkeleri arasında verimlilik düzeylerinin homojen olmadığını ve ülkelerin farklı alanlarda farklı verimlilik profilleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Analizler sonucunda, İsrail ve İspanya'da da belirgin bir şekilde yüksek ekonomik performansın sergilendiği gözlenmiştir. Buna karşılık, enerji ve doğal kaynak bakımından zengin olan ülkelerin ise enerji ve çevresel verimlilik alanlarında nispeten daha düşük performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, kaynak bolluğunun her zaman verimlilik artı-

şıyla sonuçlanmadığını, etkin politika tasarımı ve teknolojik dönüşümün belirleyici olduğunu göstermektedir.

Kısmi verimlilik ve süper verimlilik analizleri, ülkelerin hangi girdilerde ve hangi emisyon türlerinde verimsizlik yaşadığını açık biçimde ortaya koymuştur. Özellikle enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarının birçok ülkede temel verimsizlik kaynağı olduğu görülmektedir. Buna karşın bazı ülkeler, enerji kullanımını ve çevresel etkileri azaltırken ekonomik performanslarını koruyabilmiş ve bu yönleriyle iyi uygulama örnekleri sunmuştur.

Bu bulgular, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşma yolunda politika yapıcılar için önemli çıkarımlar ve yol gösterici ipuçları sunmaktadır. Enerji verimliliğini artırıcı yatırımların teşviki, temiz ve yenilenebilir enerji kay-

naklarının yaygınlaştırılması, çevresel düzenlemelerin etkin bir şekilde uygulanması ve yeşil inovasyonun desteklenmesi, ülkelerin hem ekonomik hem de çevresel verimliliklerini artırmada kritik rol oynamaktadır. Gelecek çalışmalarda, zaman boyutunun genişletilmesi, bölgesel karşılaştırmaların yapılması ve politika değişkenlerinin modele dahil edilmesi, verimlilik dinamiklerinin daha kapsamlı analiz edilmesine katkı sağlayacaktır.

ORCID

Tezcan Abasız  <https://orcid.org/0000-0001-7058-1873>

Dilek Mütevellî  <https://orcid.org/0000-0001-6599-3187>

Hakan Bakkal  <https://orcid.org/0000-0002-0256-7065>

KAYNAKÇA

- Ahmad, M., & Uddin, I. (2025). Enhancing energy efficiency in OECD economies: The role of eco-friendly technology, financial development, and clean energy investment. *Sustainable Futures*, 10, 101258. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.101258>
- Aksu, E. Ö., & Gencer, C. T. (2018). Veri zarflama analizi ile OECD ülkelerinin çevre performansının incelenmesi. *International Journal of Economic and Administrative Studies (IJEAS)*, 2018(18. EYİ Özel Sayısı), 191–206.
- 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.2015.05.022>
- Arcelus, F. J., & Arocena, P. (2005). Productivity differences across OECD countries in the presence of environmental constraints. *Journal of the Operational Research Society*, 56(12), 1352–1362.
- Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (1984). Some models for the estimation of technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078–1092.
- Batı, G. M., Usman, Ö., & Ateş, S. (2024). Firmaların sürdürülebilirlik performansları bağlamında etkinliklerinin veri zarflama analizi ile ölçülmesi. *Journal of Research in Business*, 9(1), 18–38.
- Camarero, M., Castillo, J., Picazo-Tadeo, A. J., & Tamarit, C. (2013). Eco-efficiency and convergence in OECD countries. *Environmental and Resource Economics*, 55(1), 87–106.
- Camarero, M., Picazo-Tadeo, A. J., & Tamarit, C. (2008). Is the environmental performance of industrialized countries converging? A "SURE" approach to testing for convergence. *Ecological Economics*, 66(4), 653–661.
- 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, J., Shi, H., Sivakumar, B., & Peart, M. R. (2016). Population, water, food, energy and dams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 18–28.
- Cooper, W. W., Seiford, L. M., Tone, K., & Zhu, J. (2007). Some models and measures for evaluating performances with DEA: Past accomplishments and future prospects. *Journal of Productivity Analysis*, 28(3), 151–163.
- Domagała, J., & Kadłubek, M. (2023). Economic, energy and environmental efficiency of road freight transportation sector in the EU. *Energies*, 16, 461. <https://doi.org/10.3390/en16010461>
- Emrouznejad, A., & Cabanda, E. (2015). Introduction to data envelopment analysis and its applications. In *Handbook of research on strategic performance management and measurement using data envelopment analysis* (pp. 235–255). IGI Global.
- Färe, R. C., Grosskopf, S., & Lovell, C. A. K. (1985). *The measurement of efficiency of production*. Kluwer Academic Publishers.
- Färe, R., & Primont, D. (1995). *Multi-output production and duality: Theory and applications*. Kluwer Academic Publishers.
- Färe, R., Grosskopf, S., & Hernandez, S. F. (2004). Environmental performance: An index number approach. *Resource and Energy Economics*, 26(4), 343–352.
- Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)*, 120(3), 253–290.
- Fateh, D., Eldoromi, M., & Birjandi, A. A. M. (2022). Uncertainty modeling of renewable energy sources, scheduling and operation of virtual power plants. In *Technical challenges and electricity markets* (pp. 193–208).
- Güngör, B., & Felekoğlu, B. (2018). Eko-verimlilik kavramı, gelişimi ve uygulanma süreci. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(Özel Sayı), 90–104.
- Han, A. (2023). Yeşil ekonomi yolunda OECD ülkelerinde yenilenebilir enerji tüketimi analizi. *Verimlilik Dergisi*, 58(2), 185–200.
- Hou, H., Lu, W., Liu, B., Hassanein, Z., Mahmood, H., & Khalid, S. (2023). Exploring the role of fossil fuels and renewable energy in determining environmental sustainability: Evidence from OECD countries. *Sustainability*, 15(3), 2048. <https://doi.org/10.3390/su15032048>
- Kapçak, S. (2024). Döngüsel ekonomi bileşenlerinin ekolojik ayak izi üzerindeki etkisi: Panel veri analizi. *Uluslararası Ekonomi, İşletme ve Politika Dergisi*, 8(1), 124–138.
- Karlılar Pata, S., & Balcilar, M. (2024). Decarbonizing energy: Evaluating fossil fuel displacement by renewables in OECD countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(21), 31304–31313. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33324-8>
- Kılınç, N. Ş., & Kılınç, E. C. (2024). Yeşil inovasyonun enerji verimliliğine etkisi üzerine bir panel veri analizi. *Uluslararası Ekonomi ve Yenilik Dergisi*, 10(1), 1–22.
- Liddle, B., & Sadorsky, P. (2021). Energy efficiency in OECD and non-OECD countries: Estimates and convergence. *Energy Efficiency*, 14, 72. <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09992-7>
- Lovell, C. K., Pastor, J. T., & Turner, J. A. (1995). Measuring macroeconomic performance in the OECD: A comparison of European and non-European countries. *European Journal of Operational Research*, 87(3), 507–518.
- Lu, C. C., Chiu, Y. H., Shyu, M. K., & Lee, J. H. (2013). Measuring CO₂ emission efficiency in OECD countries: Application of the hybrid efficiency model. *Economic Modelling*, 32, 130–135.
- McLaughlin, E., Choi, J.-K., & Kisoock, K. (2021). Techno-economic impact assessments of energy efficiency improvements in the industrial combustion systems. *Journal of Energy Resources Technology*, 144(8). <https://doi.org/10.1115/1.4053137>
- Mehdiloozad, M., Sahoo, B. K., & Roshdi, I. (2014). A generalized multiplicative directional distance function for efficiency measurement in DEA. *European Journal of Operational Research*, 232(3), 679–688.
- Özkan, M., & Özcan, A. (2018). Veri zarflama analizi (VZA) ile seçilmiş çevresel göstergeler üzerinden bir değerlendirme: OECD performans incelemesi. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 16(32), 485–508.

31. Pintér, J. D. (1997). *Global optimization with GAMS/LGO: Introduction, usage, and applications*. In *Global optimization: Scientific and engineering applications with Mathematica examples*. GAMS Global Optimization Workshop, Washington, DC. https://www.gams.com/archives/presentations/present_pinter.pdf
32. Prokopenko, J. (2011). *Verimlilik yönetimi: Uygulamalı el kitabı* (O. Baykal, N. Atalay, & E. Fidan, Çev.). Milli Prodük-tivite Merkezi Yayınları.
33. 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.
34. 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 Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) countries. *Journal of Cleaner Production*, 105, 241–252.
35. Ryan, L., & Campbell, N. (2012). *Spreading the net: The multiple benefits of energy efficiency improvements*. Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://doi.org/10.1787/5k9crzjbpkkc-en>
36. Seiford, L. M., & Thrall, R. M. (1990). Recent developments in DEA: The mathematical programming approach to frontier analysis. *Journal of Econometrics*, 46(1–2), 7–38.
37. Seyhan, N. (2023). AB ülkelerinin çevre ve atık yönetimi performanslarının değerlendirilmesi: Veri zarflama analizi ve yapay sinir ağlarının birlikte uygulanması. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 14(1), 343–355.
38. Shephard, R. W. (1970). *Theory of cost and production functions*. Princeton University Press.
39. Sherman, H. D., & Zhu, J. (2006). *Improving service performance using data envelopment analysis (DEA): An application to hotel management*. Springer.
40. 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.
41. Sun, H., Edziah, B. K., Sun, C., & Kporsu, A. K. (2019). Institutional quality, green innovation and energy efficiency. *Energy Policy*, 135, 111002.
42. Telli, R., & Kanuşağı, İ. (2024). 21. yüzyılda Türkiye'nin küresel enerji jeopolitiği: Verimlilik analizi ve politika önerileri. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi (UIEAS)*, 43, 1–18.
43. Thema, J., Suerkemper, F., Couder, J., Mzavanadze, N., Chatterjee, S., Teubler, J., Thomas, S., Ürge-Vorsatz, D., Hansen, M. B., Bouzarovski, S., Rasch, J., & Wilke, S. (2019). The multiple benefits of the 2030 EU energy efficiency potential. *Energies*, 12(14), 2798. <https://doi.org/10.3390/en12142798>
44. Tone, K., & Tsutsui, M. (2011). Applying an efficiency measure of desirable and undesirable outputs in DEA to U.S. electric utilities. *Journal of CENTRUM Cathedra*, 4(2), 236–249.
45. Wei, Q. (2001). Data envelopment analysis. *Chinese Science Bulletin*, 46(16), 1321–1332.
46. Werther, W. B., Ruch, W. A., & McClure, L. (1986). *Productivity through people*. McGraw-Hill.
47. Woo, C., Chung, Y., Chun, D., Seo, H., & Hong, S. (2015). The static and dynamic environmental efficiency of renewable energy: A Malmquist index analysis of OECD countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 367–376.
48. Xia, Z., Abbas, Q., Mohsin, M., & Song, G. (2020). Trilemma among energy, economic and environmental efficiency: Can dilemma of EEE address simultaneously in era of COP 21? *Journal of Environmental Management*, 276, 111322. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111322>
49. Yalçın, H. E., & Yalçın, C. (2021). Enerji verimliliği, yenilenebilir enerji ve cari işlemler dengesi: Ekonometrik bulgular ve Türkiye için senaryo analizleri. *Bankacılar Dergisi*, 119, 3–35.
50. Yaşar, F., & Akin, F. (2023). Doğu Avrupa ülkelerinin çevresel performansının veri zarflama analizi yöntemiyle incelenmesi. *Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 5(2), 36–50.
51. Yu, Y., Yamaguchi, K., Thuy, T. D., & Kittner, N. (2022). Will the public in emerging economies support renewable energy? Evidence from Ho Chi Minh City, Vietnam. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112942.
52. Yücel, D., & Doğan, N. (2023). Eko-inovasyon ve döngüsel ekonomi paradigması. *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15(4), 357–374.
53. Yükçü, S., & Atağan, G. (2009). Etkinlik, etkililik ve verimlilik kavramlarının yarattığı karışıklık. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 23(4).
54. Zaim, O., & Taskin, F. (2000). Environmental efficiency in carbon dioxide emissions in the OECD: A non-parametric approach. *Journal of Environmental Management*, 58(2), 95–107.
55. Zastempowski, M. (2023). Analysis and modeling of innovation factors to replace fossil fuels with renewable energy sources: Evidence from European Union enterprises. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113262.
56. Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2006). Slacks-based efficiency measures for modeling environmental performance. *Ecological Economics*, 60(1), 111–118.
57. Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2008). Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies. *Energy Economics*, 30(1), 1–14.
58. Zhou, P., Poh, K. L., & Ang, B. W. (2007). A non-radial DEA approach to measuring environmental performance. *European Journal of Operational Research*, 178(1), 1–9.
59. Zofio, J. L., & Prieto, A. M. (2001). Environmental efficiency and regulatory standards: The case of CO₂ emissions from OECD industries. *Resource and Energy Economics*, 23(1), 63–83.