

ÖZGÜN ARAŞTIRMA / ORIGINAL ARTICLE



Copyright@Author(s) - Available online at [dergipark.org.tr/en/pub/igusbd](http://dergipark.org.tr/en/pub/igusbd).  
Content of this journal is Licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 (CC BY-NC-ND) International License.

## Çevresel Sürdürülebilirlik için Yeşil Enerji Verimliliği: BRICS Ülkelerinden Kanıtlar

### Green Energy Efficiency for Environmental Sustainability: Evidence from BRICS Countries

Kumru TÜRKÖZ 

#### Öz

**Amaç:** Bu çalışma, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik büyüme arasındaki dengeyi esas alan yeşil büyüme çerçevesinde, BRICS ülkelerinde (Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin, Güney Afrika) 1995–2023 dönemi boyunca yeşil enerji verimliliğinin gelişimini analiz etmektedir. Çalışmanın temel hedefi, bu ülkelerin enerji bileşiminde yaşanan dönüşümün çevresel ve ekonomik sonuçlarını değerlendirerek, yeşil enerji verimliliğindeki değişimin kaynaklarını teknik, yönetsel ve yapısal boyutlarıyla ortaya koymaktır.

**Yöntem:** Araştırmada, enerji girdisinin sermaye ve emekle ikame edilebilirliğini dikkate alan ve çevre üzerindeki baskıyı istenmeyen çıktı olarak modele entegre eden veri zarflama analizine (Data Envelopment Analysis - DEA) dayalı Malmquist toplam faktör verimliliği endeksi kullanılmıştır. Bu yöntem aracılığıyla yeşil enerji verimliliğinde zaman içinde meydana gelen değişim, teknik değişim ve verimlilik değişimi bileşenleri bazında ayrıştırılmıştır.

**Bulgular:** Ampirik bulgular, incelenen dönemde beş ülkenin ortalama yeşil enerji verimliliğinin %10,2 oranında arttığını ve bu artışın temel kaynağının teknik değişim olduğunu ortaya koymaktadır. Çin, %10,3'lük artışla yeşil enerji verimliliği artışında en yüksek performansı sergileyen ülke olurken, fosil yakıtlara yüksek bağımlılığı nedeniyle Rusya, %2,9 ile yeşil enerji verimliliğinde en düşük performansı göstermiştir.

**Sonuç:** BRICS ülkelerinin yeşil enerji verimliliğinin gelişimi; düşük karbonlu ekonomiye geçişin, yeşil teknolojilerin ve sürdürülebilir kalkınma politikalarının başarılı şekilde hayata geçirildiğine işaret etmektedir. Ancak bu sürecin sürdürülebilirliğinin sağlanması için sadece teknolojik gelişmeler yeterli değildir; aynı zamanda yönetsel, finansal ve birtakım yapısal reformların da geliştirilmesi gerekir. Böylece yeşil enerji verimliliği, ekonomik büyümenin ekolojik temelde sürdürülmesinde kilit bir araç hâline gelebilir.

#### Anahtar Kelimeler

Yeşil Büyüme, Enerji Verimliliği, Çevresel Sürdürülebilirlik, BRICS, Malmquist Verimlilik Endeksi.

Doç. Dr., Balıkesir Üniversitesi,  
İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi,  
İktisat Bölümü, Balıkesir, Türkiye.  
✉ [kumru.turkoz@balikesir.edu.tr](mailto:kumru.turkoz@balikesir.edu.tr)

Geliş/Received: 20.05.2025  
Kabul/Accepted: 12.11.2025

## Abstract

**Aim:** This study analyzes the development of green energy efficiency in BRICS countries (Brazil, Russia, India, China, and South Africa) between 1995 and 2023 within the framework of green growth, which emphasizes the balance between environmental sustainability and economic growth. The primary objective is to evaluate the environmental and economic outcomes of the transformation in the energy mix of these countries and to identify the sources of change in green energy efficiency from technical, managerial, and structural perspectives.

**Method:** The study employs the Malmquist Total Factor Productivity Index based on Data Envelopment Analysis (DEA), which accounts for the substitutability of energy inputs with capital and labor, and incorporates environmental pressure as an undesirable output. Through this method, changes in green energy efficiency over time are decomposed into components of technical change and efficiency change.

**Results:** Empirical findings reveal that the average green energy efficiency of the five countries increased by 10.2% during the period, with this improvement being primarily driven by technical change. China demonstrated the highest performance with a 10.3% increase in green energy efficiency, while Russia exhibited the lowest performance with a 2.9% increase, largely due to its continued dependence on fossil fuels.

**Conclusion:** The improvement in green energy efficiency across BRICS countries indicates successful implementation of low-carbon economy transitions, green technologies, and sustainable development policies. However, ensuring the sustainability of this progress requires more than technological advancements; it also necessitates the development of managerial, financial, and structural reforms. In this context, green energy efficiency can become a key instrument for maintaining economic growth on an ecological foundation.

## Keywords

Green Growth, Energy Efficiency, Environmental Sustainability, BRICS, Malmquist Productivity Index.

## Giriş

Çevresel ve ekonomik kalkınma endişelerini birbirine bağlama konusunda ortak bir anlayış olarak sürdürülebilirlik, son yirmi yılın en çok kullanılan kavramlarından birisidir. Çünkü reel dünyada sürdürülebilir olarak tanımlanamayacak neredeyse hiçbir şey bulunmamaktadır - görünüşe göre her şey ya doğrudan sürdürülebilirlikle ilişkilidir ya da onunla eşleştirilebilir. Sürdürülebilir şehirler, ekonomiler, kaynak yönetimi, işletmeler, geçim kaynakları ve özellikle sürdürülebilir kalkınma bunlardan yalnızca birkaçıdır (Scoones, 2007, s.589). Sürdürülebilirlik kavramının anlamlı olması için, belirli bir şeyi sürdürmeyi, yenilemeyi veya onarmayı ifade etmeli, ancak aynı zamanda mevcut ekonomik baskılar ile çevrenin gelecekteki ihtiyaçları arasındaki dengeyi sağlamanın etik boyutunu da içermelidir (Wilkinson, Hill & Gollan, 2001, s.1492).

Çevresel sürdürülebilirlik, insan yaşamını sürdüren küresel yaşam destek sistemlerini sonsuza kadar devam ettirmeyi amaçlar. Küresel ekosistemin kaynak kapasiteleri, gıda, su, hava, enerji gibi hammadde girdileri sağlarken; emme kapasiteleri çıktıları veya atıkları özümser. Bu kaynak ve emme kapasiteleri büyüktür ancak sınırlıdır; sürdürülebilirlik, bunların tükenmesinden ziyade sürdürülmesini gerektirir (Goodland, 1995, s.6). Dolayısıyla çevresel sürdürülebilirlik, doğal kaynakların tükenmesini veya bozulmasını önlemek için çevreyle uyumlu bir etkileşim anlamına gelir ve ekosistemlerin gelişip gelecek nesilleri desteklemesini sağlar. Çevresel sürdürülebilirliğin temel ilkelerini doğal kaynakların korunması, ekosistemin korunması ve kirliliğin azaltılması şeklinde ifade etmek mümkündür (Zafar, 2024, s.332). Çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması için temelde ekolojik taşıma kapasitesinin altında kalmak, kaynak rezervlerini tüketmemek ve teknoloji geliştirmenin olumsuz etkilerini en aza indirmek gibi bir takım hedefler mevcuttur (Dong & Hauschild, 2017, s.697).

Çevresel sürdürülebilirlik küresel alanda kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. 2015 yılında tüm Birleşmiş Milletler üye devletleri tarafından kabul edilen "Sürdürülebilir Kalkınma için 2030 Gündemi" ile insanlar ve gezegen için hem bugün hem de gelecekte barış ve refah için ortak bir plan sunulmuştur. Küresel bir ortaklık içinde gelişmiş ve gelişmekte olan tüm ülkelere acil bir eylem çağrısı

olan bu planda, Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarından (Sustainable Development Goal-SDG) SDG7 ile uygun fiyatlı, güvenilir, sürdürülebilir ve modern enerjiye erişimi garantilemek ve SDG7.2 ve SDG 7.3 alt hedefleri ile sırasıyla 2030 yılına kadar küresel enerji karışımında yenilenebilir enerjinin payını önemli ölçüde artırmak ve 2030 yılına kadar enerji verimliliğindeki küresel iyileştirme oranını iki katına çıkarmak gibi hedeflere yer verilmiştir (United Nations, 2015). Dolayısıyla küresel alanda temiz enerjiye geçiş ve enerji verimliliğinin iyileştirilmesi çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından odaklanılan en temel göstergeler arasında yer almaktadır.

Enerji verimliliği, sera gazı emisyonlarını azaltmanın ve diğer enerji politikası hedeflerine ulaşmanın temel araçlarından biri olarak kabul edilmektedir (Gillingham, Newell & Palmer, 2009, s.597). Bu nedenle enerji verimliliği artık çoğu gelişmiş ülkenin kamu politikası gündeminde önemli bir yer tutmaktadır. Enerji verimliliğinin kesin bir niceliksel ölçüsü bulunmamakla birlikte en genel tanımıyla enerji verimliliği, aynı miktarda hizmet veya faydalı çıktı üretmek için daha az enerji kullanmak anlamına gelir (Patterson, 1996, s.377). Ancak enerji verimliliğini arttırmak enerjinin örtük fiyatını düşürerek enerji kullanımını daha uygun hale getirebilir, buna literatürde "geri tepme" etkisi adı verilmektedir. Dolayısıyla enerji verimliliği, tek başına birçoklarının iddia ettiği kadar "çevre dostu" olmayabilir ve teşvik edilmesi, enerji kullanımında ve dolayısıyla karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonlarında doğrudan bir azalmaya yol açmayabilir. Bu nedenle amaç daha az enerji kullanımından ziyade daha az CO<sub>2</sub> emisyonu olmalı ve nihayetinde enerji büyümesi CO<sub>2</sub> emisyonlarından ayrıştırılmalıdır (Herring, 2006, s.10,19).

Geleneksel enerji verimliliği göstergeleri, enerji tüketimini ekonomik bir çıktı üreten tek bir girdi olarak hesaba katar; bu nedenle, sermaye ve emek gibi diğer bazı önemli girdiler göz ardı edilir. Oysa enerji ile emek ve sermaye stoku gibi diğer girdi faktörleri arasında ikame etkileri vardır. Dolayısıyla enerji tüketimi kısmi faktör enerji verimliliği açısından değerlendirilirse, sonuç yanıltıcı bir tahmin olabilir (Zhang, Cheng, Yuan & Gao, 2011, s.644). Toplam faktör enerji verimliliği (Total Factor Energy Efficiency-TFEE) olarak adlandırılan enerji verimliliği endeksi ise, ekonomik çıktı (Gayrisafi Yurt İçi Hasıla-GSYH) üretmek için enerjiyi, emeği ve sermaye stokunu çoklu girdiler olarak içerir (Hu & Wang, 2006, s.3207). Bu endeks aynı zamanda istenen çıktı koşulları altında istenmeyen çıktının (çevre kirliliği) en aza indirildiği durumu da ölçmeye olanak tanımaktadır. Kaynak girdisi ve çevresel kaybin orijinal TFEE temeline entegre edilmesiyle elde edilen bu endeks yeşil toplam faktör enerji verimliliği (Green Total Factor Energy Efficiency-GTFEE) olarak adlandırılmaktadır (Wu, Hao & Ren, 2020, s.5-6; Ren, 2020, s.3497; Meng & Qu, 2022, s.2).

Bu çalışmada, BRICS (Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin ve Güney Afrika) ülkelerinde çevresel sürdürülebilirlik için kaynak girdisi ve çevresel maliyetleri birlikte dikkate alan yeşil toplam faktör enerji verimliliğinin gelişimini ve kaynaklarını ölçmek ve ülkeler arası farklılıkları tespit etmek amaçlanmıştır. Çevre-enerji verimliliği bağlantısının bu ülkeler özelinde araştırılmasının bir takım gerekçeleri bulunmaktadır. Bu gerekçeleri şöyle özetlemek mümkündür: (i) Statista (2025) verilerine göre, 2023 yılı itibarıyla BRICS ülkeleri 3 milyardan fazla nüfusuyla dünya nüfusunun %40'ından fazlasını ve dünya gayri safi yurtiçi hasılasının %34,92'sini oluşturmaktadır. Bu nedenle bu ülkeler dünyanın en hızlı yükselen piyasa ekonomileri olarak görülmektedir. (ii) Bu büyük nüfus ve yüksek hasıla, yüksek büyüme potansiyelini yansıtmakta ancak aynı zamanda çevre üzerinde de yüksek bir baskı yaratmaktadır (Hussain & Doğan, 2021, s.2). Enerdata (2024) verilerine göre, 2010 yılından 2023 yılına kadar BRICS'ten kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonları küresel emisyonların %46'sından %49'una yükselmiştir. Çin tek başına küresel emisyonların üçte birini, Hindistan ise %8'ini oluşturmaktadır. Ayrıca BRICS ülkelerinde CO<sub>2</sub> yoğunluğundaki azalma yavaşlamaktadır. 2010-2019 döneminde yıllık %2,6 olan bu oran, 2023 yılında %0,6'ya düşmüştür. (iii) 2020 yılı itibarıyla BRICS ülkelerinin enerji sektörü, dünya nüfusunun %40'ına (3,08 milyar kişi) enerji sağlamakta, küresel enerji tüketiminin %37'sini ve yenilenebilir enerji kullanımının %42'sini oluşturmaktadır. BRICS ülkelerinin enerji sistemlerindeki önemli farklılıklar nedeniyle, ülkelerin her biri enerji sektörünün gelişiminde farklı zorluklarla karşı karşıyadır ve farklı kalkınma hedefleri belirlemektedir. Ancak temelde beş üye ülke de öncelikli olarak enerji kaynaklarının maksimum verimle kullanılması ve çevre üzerindeki olumsuz etkiyi azaltmak için temiz ve düşük karbonlu enerji sistemleri oluşturmak gibi stratejilere odaklanmaktadır (BRICS Energy Report, 2020). Bu gelişmelere bakıldığında çevresel sürdürülebilirlik için yeşil enerji verimliliğinin gelişimi ve bileşenleri dünyanın en büyük enerji tüketicileri ve üreticileri ile en büyük CO<sub>2</sub> yayıcıları arasında yer alan BRICS ülkeleri açısından oldukça önemli ve araştırılmaya değer bir

konudur. Bu bağlamda, BRICS ülkelerinin yeşil enerji verimliliğinin değerlendirilmesi, yalnızca mevcut ülkelerdeki yeşil dönüşüm hakkında değil aynı zamanda küresel yeşil kalkınma için birtakım öngörüler sağlayarak sınırlı literatüre katkı sağlayabilir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde tasarlanmıştır: Çevresel sürdürülebilirlik ve yeşil enerji verimliliği arasındaki teorik bağlantıya yer verilen giriş bölümünün ardından ikinci bölümde; konu ile ilgili literatür özetlenmiştir. Üçüncü bölümde; veri, yöntem ve bulgulara yer verildikten sonra son olarak dördüncü bölümde; bulgular tartışılıp birtakım politika çıkarımları sunulmuştur.

## Literatür

Yeşil enerji verimliliğinin gelişiminin ve bölgesel farklılıkların tespit edilmesi için özellikle Çin kapsamında çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Çünkü Çin, her bakımdan yeşil bir kalkınma modeline dönüşmektedir ve yeşil enerji verimliliğinin artırılması bu dönüşümün temel bir bileşenidir (Meng & Qu, 2022).

Çin özelinde yapılan araştırmalar ayrıca yeşil enerji verimliliğini etkileyen faktörleri ampirik olarak analiz etmek için ekonomik büyüme, endüstriyel yapı, doğrudan yabancı yatırımlar, mülkiyet hakkı yapısı, teknolojik ilerleme, açıklık, enerji yapısı ve çevre düzenlemesi gibi faktörleri dikkate almaktadır. Bu çalışmalardan; Zhang ve Tan (2016) çalışmalarında, 2005-2012 yılları arasında Çin'deki 285 il düzeyindeki şehrin yeşil toplam faktör verimliliğini (gren total factor productivity-GTFP) Malmquist verimlilik endeksi aracılığıyla tahmin etmişlerdir. Bulgular, Çin'deki başlıca şehirlerde GTFP'nin yıllık büyümesini %3,5 olduğunu ve genel büyümenin kademeli olarak azaldığını göstermiştir. Chen, Lan, Gao ve Sun (2018) çalışmalarında, 2000-2014 döneminde Çin'in 36 sanayi sektörünün yeşil toplam faktör verimliliği büyümesini Küresel Malmquist-Luenberger (Global Malmquist-Luenberger-GML) verimlilik endeksiyle ölçmüşlerdir. Bulgular, endüstriyel GTFP'nin ortalama olarak yılda %0,02 oranında azaldığını göstermiştir. Meng ve Qu (2022) çalışmalarında, 2011-2018 döneminde Çin'in 29 eyaletinin yeşil enerji verimliliğini Süper- Slack Tabanlı Ölçüm (Slack Based Measure -SBM) ve Küresel Malmquist-Luenberger endeksi yöntemiyle araştırmışlardır. Ampirik bulgular, Çin'in yeşil enerji verimliliğinin artan bir eğilim yerine yavaşça azalan bir eğilim gösterdiğini ve verimlilik iyileştirmesinde teknolojik ilerlemenin önemli bir faktör olduğuna işaret etmiştir.

Çin'in bölgesel düzeyde yeşil enerji verimliliğini araştıran çok sayıda çalışma doğu bölgesinin batı ve orta bölgelere kıyasla görece olarak daha iyi performans gösterdiğine dair ortak bir görüş birliğini savunmaktadır. Bu çalışmalardan örneğin; Ren (2020), 2007-2016 döneminde Çin'deki bölgesel yeşil toplam faktör verimliliğini Malmquist verimlilik endeksiyle araştırmıştır. Ampirik bulgular, daha düşük çevre kirliliği endeksine sahip illerin çoğunlukla batı ve doğu bölgelerinde olduğunu, daha yüksek kirlilik endeksine sahip illerin ise çoğunlukla merkezi iç bölgelerde dağıldığını göstermiştir. Zhu ve Zheng (2020) çalışmalarında, 2000-2017 döneminde 30 Çin bölgesinin GTFEE'lerini slack tabanlı ölçüm yöntemi ile değerlendirmişlerdir. Bulgular, GTFEE değerlerinin bölge bazında önemli ölçüde farklılaştığına ve Doğu Çin'deki çoğu bölgenin yüksek GTFEE'lere sahipken, Orta ve Batı Çin'in GTFEE değerlerinin daha düşük olduğuna işaret etmiştir. He, Han ve Wang (2021), 2005'ten 2018'e kadar Çin'deki 30 eyaletin yeşil toplam faktör verimliliğini Slack tabanlı ölçüm-veri zarf analizi (SBM-DEA) ve Malmquist endeksiyle ölçtükleri çalışmalarında, Doğu, Orta ve Batı Çin'de GTFP açısından önemli farklılıklar olduğu bulgusuna ulaşmışlardır. Li ve Ma (2021), 2000-2018 yılları arasında 30 Çin eyaletinin yeşil toplam faktör enerji verimliliğini Süper-SBM modeliyle ölçmüşlerdir. Bulgular, ortalama GTFEE'ye göre, doğu bölgesinin en yüksek sırada yer aldığını, bunu merkez bölgesinin takip ettiğini ve batı bölgesinin en sonda yer aldığını göstermiştir. Zhuang, Wang, Lu ve Chen (2022) çalışmalarında, 2005-2017 döneminde Çin'in 30 bölgesi için yeşil toplam faktör verimliliğini ölçmüşlerdir. SBM modeli bulguları, Çin'deki yeşil toplam faktör verimliliğinde teknik değişime atfedilen hızlı bir iyileşme olduğunu ancak Çin'in üç bölgesi arasında önemli farklılıklar olduğunu göstermiştir. Buna göre, Doğu bölgesi yeşil toplam faktör verimliliği açısından diğerlerinden önemli ölçüde daha iyi performans göstermektedir.

Yeşil enerji verimliliğinin gelişiminin Çin dışında ülke/bölge bazında ya da ülkeler grubu olarak ele alınıp incelendiği çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bunlar arasında örneğin; Camiato, Rebelatto ve Rocha (2016) çalışmalarında, 1993-2010 döneminde BRICS ülkelerinde istenmeyen çıktı altında toplam faktör enerji verimliliğini veri zarflama analizi (DEA) ve Slack Tabanlı Ölçüm (SBM) modelleriyle incelemişlerdir. Bulgular, Brezilya'nın en yüksek TFE oranına sahip ülke olduğunu, onu sırasıyla

Güney Afrika, Çin, Hindistan ve Rusya'nın izlediğini göstermiştir. Sun (2022) çalışmasında, 2003-2012 döneminde Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) ve BRICS ülkelerinin GTFP'sini analiz etmiştir. Süper-SBM modeli bulguları, BRICS ülkelerinin GTFP'sinin önemli ölçüde iyileştiğini, ancak OECD ülkeleriyle karşılaştırıldığında hala önemli bir fark olduğunu göstermiştir. Ayrıca, BRICS ülkeleri arasında Brezilya'nın en yüksek verimlilik değerine sahipken, enerji tüketimi ve kirlilik açısından çok önde olan Çin'in en düşük verimlilik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Zhang ve Wang (2023) çalışmalarında, Bölgesel Kapsamlı Ekonomik Ortaklık (Regional Comprehensive Economic Partnership -RCEP) ülkelerinde 2010-2019 döneminde, Süper-SBM modeli ve Küresel Malmquist-Luenberger endeksiyle GTFEE değerlerini ölçmüşlerdir. Bulgular, RCEP üyelerinin GTFEE'sinin düşük ve hem mekânsal hem de zamansal olarak eşit olmayan bir şekilde dağılma eğiliminde olduğunu göstermiştir. Ayrıca çalışmada yeşil enerji verimliliğindeki iyileşmelerin öncelikli olarak teknolojik ilerlemeden kaynaklandığı da vurgulanmıştır. Zhang, Zhu ve Li (2024) çalışmalarında, 1990-2019 döneminde 171 ekonomi için hem toplam faktör verimliliği (TFP) hem de yeşil toplam faktör verimliliğini (GTFP) hesaplayarak bunların temiz enerji dönüşümleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. SBM yaklaşımına dayalı Malmquist-Luenberger endeksi bulguları, GTFP'nin temiz enerji tüketimini %3,92 oranında artırabileceğini ve bu etkinin özellikle yeşil verimlilik değişimi ve yeşil teknik değişiminden kaynaklandığını göstermiştir. Ma vd. (2024) çalışmalarında, 58 Kuşak ve Yol Girişimi (The Belt and Road Initiative-BRI) ülkesinde 2005-2019 döneminde yeşil toplam faktör enerji verimliliğinin gelişimini Süper-SBM modeli ile incelemişlerdir. Bulgular, geliştirmekte olan ekonomilerle karşılaştırıldığında, gelişmiş ekonomilerin GTFEE'sinin daha yüksek olduğunu ve incelenen dönemde genel BRI yeşil enerji verimliliğinin 0,75'ten 0,56'ya düştüğünü göstermiştir. Hamid, Wang ve Wang (2025), 2000-2019 döneminde altı Güneydoğu Asya (ASEAN-6) ülkesinde küresel Malmquist-Luenberger verimlilik endeksiyle tarımsal GTFP'nin zamansal ve mekânsal dinamik değişimini inceledikleri çalışmalarında, söz konusu dönemde tarımsal GTFP'nin arttığını ve yeşil teknolojik yeniliğin GTFP'ya katkıda bulunduğunu ancak yeşil teknik verimliliğin tarımsal GTFP'yi kısıtladığını tespit etmişlerdir. Lee ve Ogata (2025), 1995-2021 döneminde OECD ülkelerinde yeşil toplam faktör enerji verimliliğinin gelişimini Süper SBM-DEA modeliyle araştırmışlardır. Bulgular, OECD ülkelerinde GTFEE'nin sürekli artma eğiliminde olduğunu ve ortalama puanın 1995'te 0,7814'ten 2021'de 0,8894'e yükseldiğini ortaya koymuştur.

## Veri, Yöntem ve Bulgular

### Veri

1995-2023 döneminde BRICS ülkeleri için yeşil toplam faktör enerji verimliliğinin gelişimi ve kaynakları Malmquist toplam faktör verimliliği endeksi ile hesaplanmıştır. Bu amaçla, endekslerin ölçümü için Coelli (1996) tarafından geliştirilen DEAP 2.1 programı kullanılmıştır. Verimlilik ölçümü için kullanılan değişkenlere ve değişkenlere ait tanımlayıcı istatistiklere Tablo 1'de yer verilmiştir.

**Tablo 1.** Değişkenlere ait tanımlayıcı istatistikler

	Değişken	Gözlem	Ortalama	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	Birim	Kaynak
Girdi	İşgücü (L)	145	280	287	17,393	783	milyon	World Bank (2025)
	Brüt Sermaye Oluşumu (K)	145	861	1,55	2,76	7,01	sabit 2015 milyar dolar	World Bank (2025)
	Birincil Enerji Tüketimi (E)	145	32,391	38,421	4,023	170,739	exajoule	Energy Institute (2024)
Çıktı	İstenen: GSYH (Q)	145	2,490	3,530	193	17,200	sabit 2015 milyar dolar	World Bank (2025)
	İstenmeyen: CO <sub>2</sub> (Enerji kaynaklı emisyonlar) (CO <sub>2</sub> )	145	2206,34	2807,682	251,663	11218,37	milyon ton petrol eşdeğeri	Energy Institute (2024)

Tablo 1’de görüldüğü gibi modelde üç girdi ile istenen ve istenmeyen olmak üzere iki çıktı dikkate alınmaktadır. İstenmeyen çıktı olan CO<sub>2</sub> emisyonları modele 1/CO<sub>2</sub> şeklinde dâhil edilmekte ve maksimizasyon işlemiyle istenmeyen çıktı en aza indirilmektedir.

## Yöntem

Enerji verimliliği eğilimlerini izlemek ve ülkeler arasında enerji verimliliği performansını karşılaştırmak için bazı uygun yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle parametrik ve parametrik olmayan yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır (Zhang vd., 2011, s.644). Stokastik sınır analizi (Stochastic Frontier Analysis-SFA) gibi parametrik yöntemler bir maliyet veya üretim fonksiyonunu tahmin eder. Bu nedenle, fonksiyon biçimindeki sapmalar bu tür modellerin sonuçlarını etkiler. Buna karşılık, parametrik olmayan yöntemler kullanıldığında maliyet veya üretim fonksiyonunu tahmin etmek gerekli değildir. Veri zarflama analizi (Data Envelopment Analysis-DEA), çoklu girdileri ve çoklu çıktıları işleyebilen parametrik olmayan bir yöntemdir (Sadjadi & Omrani, 2008, s.4247).

DEA-Malmquist endeksi, daha önce nicelik endekslerini mesafe fonksiyonlarının oranları olarak oluşturmayı öneren Malmquist (1953)’ün analizinden hareketle Caves, Christensen ve Diewert (1982) tarafından geliştirilmiştir (Fare, Grosskopf, Norris & Zhang, 1994, s.68). Malmquist endeksi, mesafe fonksiyonları kullanılarak tanımlanmaktadır. Mesafe fonksiyonları, davranışsal bir hedef (maliyet minimizasyonu veya kar maksimizasyonu gibi) belirtmeye gerek kalmadan çok girdili ve çok çıktılı bir üretim teknolojisini tanımlamaya olanak tanımaktadır. Bunlar girdi mesafe fonksiyonları ve çıktı mesafe fonksiyonları olarak ele alınmaktadır. Malmquist toplam faktör verimlilik endeksi, her veri noktasının ortak bir teknolojiye göre mesafelerinin oranını hesaplayarak iki veri noktası (örneğin, belirli bir ülkenin iki bitişik zaman periyodundaki verileri) arasındaki toplam faktör verimlilik değişimini ölçmektedir (Coelli & Rao, 2003, s.5-6).

Çıktıya dayalı Malmquist verimlilik değişim endeksini tanımlamak için, her zaman periyodu  $t = 1, \dots, T$  için üretim teknolojisi  $S^t$ ’nin girdilerin  $x^t \in \mathbb{R}_+^N$ , çıktılara  $y^t \in \mathbb{R}_+^M$  dönüşümünü modellediği varsayılmaktadır.  $t + 1$  anındaki teknolojiyle  $(x^t, y^t)$ ’yi elde etmek için çıktıda maksimum görece değişimi ölçen  $D_o^{t+1}(x^t, y^t)$  şeklinde bir mesafe fonksiyonu tanımlanabilir (Fare vd., 1994, s. 68-70). Caves vd. (1982) Malmquist verimlilik endeksini şu şekilde tanımlamaktadır:

$$M^t = \frac{D_o^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^t(x^t, y^t)} \quad (1)$$

(1) no’lu bu formülasyonda, t dönemindeki teknoloji referans teknolojidir. Alternatif olarak,  $t + 1$  tabanlı bir Malmquist endeksi şu şekilde tanımlanabilir:

$$M^{t+1} = \frac{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^{t+1}(x^t, y^t)} \quad (2)$$

Çıktı tabanlı Malmquist verimlilik değişim endeksi, iki Malmquist üretkenlik endeksinin geometrik ortalaması Denklem (3)’te yer verildiği gibi yazılabilir:

$$M_o \left( x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t \right) = \left[ \left( \frac{D_o^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^t(x^t, y^t)} \right) \left( \frac{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^{t+1}(x^t, y^t)} \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

Fare vd. (1994)’ün çalışmasından hareketle bu endeks Denklem (4)’teki gibi aşağıdaki şekliyle de ifade edilebilir:

$$M_o \left( x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t \right) = \left( \frac{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^t(x^t, y^t)} \right) \times \left[ \left( \frac{D_o^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \right) \left( \frac{D_o^t(x^t, y^t)}{D_o^{t+1}(x^t, y^t)} \right) \right]^{1/2} \quad (4)$$

Denklem (4)’te tanımlanan Malmquist Toplam Faktör Verimlilik Endeksi’nin iki bileşeni bulunmaktadır. Bunlardan ilki; verimlilik değişimi (EFFCH), ikincisi ise teknik değişimdir (TECHCH). Denklem sağ tarafında parantez dışında yer alan ilk oran,  $t$  ve  $t + 1$  yılları arasındaki görece verimlilikteki değişimi (yani, gözlenen üretimin maksimum potansiyel üretimden ne kadar uzakta olduğu) ölçer. Parantezin içerisindeki iki oranın geometrik ortalaması ise,  $x^t$  ve  $x^{t+1}$ ’de değerlendirilen

iki dönem arasındaki teknik değişimi yakalar ve ülkenin üretim sınırındaki kaymayı gösterir. Ayrıca verimlilik değişimi kendi içerisinde saf verimlilik değişimi (PECH) ve ölçek verimlilik değişimi (SECH) olarak ayrıştırılır ve  $EFFCH = PEFFCH \times SECH$  şeklinde ifade edilir. EFFCH terimi ölçeğe göre sabit getiri altında hesaplanan verimlilik değişimini gösterirken, PEFFCH ölçeğe göre değişken getiri altında hesaplanan verimlilik değişimini ifade eder. Dolayısıyla Malmquist verimlilik endeksi (TFEE)  $M_o(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = TECHCH \times PEFFCH \times SECH$  şeklinde ele alınabilir (Fare vd., 1994, s.74-75).

## Bulgular

BRICS ülkelerinin yeşil enerji verimliliği performanslarının zaman içindeki değişiminin incelendiği bu çalışmada, istenmeyen çıktı altında hesaplanan yeşil enerji verimliliği değerlerine ilişkin bulgular şu şekildedir:

**Tablo 2.** Ülkelerin Yıllık Yeşil Toplam Faktör Enerji Verimliliği (GTFEE) Bulguları

Yıl	Brezilya	Rusya	Hindistan	Çin	Güney Afrika	Ortalama
1996	1,335	1,200	1,118	0,150	1,482	0,832
1997	1,329	0,617	0,991	1,138	1,017	1,210
1998	1,029	1,417	1,222	1,469	0,946	1,199
1999	1,018	0,825	1,030	1,352	1,053	1,042
2000	1,328	1,390	1,189	1,266	1,099	1,250
2001	1,075	0,713	1,208	0,151	1,049	0,681
2002	1,156	1,365	1,280	1,601	1,073	1,584
2003	1,042	0,948	1,170	1,748	1,058	1,164
2004	0,072	1,280	0,117	1,490	1,102	0,579
2005	1,788	0,236	1,569	0,201	1,087	0,934
2006	1,135	1,252	1,266	1,598	0,806	1,183
2007	1,209	1,229	1,391	0,978	1,332	1,219
2008	1,156	1,265	1,189	0,333	1,713	1,094
2009	1,079	0,800	1,399	1,414	0,387	1,049
2010	0,554	1,072	0,411	1,858	1,070	0,866
2011	1,124	1,175	1,007	1,684	0,978	1,284
2012	1,047	1,127	1,011	0,544	1,006	0,918
2013	1,086	1,038	1,560	1,636	0,997	1,592
2014	1,050	1,014	1,252	0,775	0,997	1,150
2015	0,466	0,952	1,230	0,377	0,884	0,711
2016	0,901	1,009	1,052	1,310	1,088	1,064
2017	1,021	1,165	1,109	1,411	0,990	1,662
2018	1,022	0,585	1,470	1,289	0,989	1,215
2019	1,012	1,041	0,129	1,123	1,010	0,687
2020	0,972	0,936	0,959	1,050	0,978	0,978
2021	1,079	1,115	1,046	1,044	1,001	1,654
2022	1,044	0,975	1,114	0,328	0,977	0,817
2023	1,064	1,074	0,737	1,579	0,981	1,242
Ortalama	1,043	1,029	1,079	1,103	1,041	1,102

Malmquist endeks değeri 1'den büyük değer aldığında enerji verimliliğinin arttığı, 1'den düşük olduğunda azaldığı ve 1 olduğunda ise değişmediği varsayılmaktadır, 1996'dan 2023 yılına kadar geçen sürede Brezilya'nın yeşil enerji verimliliği ortalama 1,043, Rusya'nın 1,029, Hindistan'ın 1,079, Çin'in 1,103, Güney Afrika'nın 1,041 ve beş ülkenin ortalamasında ise 1,102 olarak gerçekleşmiştir. Buna göre, incelenen dönemde ele alınan beş ülkenin ortalama yeşil enerji verimliliği %10,2 oranında artmıştır. Ulaşılan bu bulgular; Camioto vd. (2016) ve Sun (2022)'nin çalışmasında ulaştığı BRICS ülkelerinin yeşil toplam faktör verimliliğinin önemli ölçüde iyileştiği bulgularıyla benzerlik taşımaktadır.

İncelenen dönemde yeşil enerji verimliliği açısından en iyi performansı Çin sergilerken; onu sırasıyla Hindistan, Brezilya, Güney Afrika izlemekte, en düşük yeşil enerji verimliliği ise Rusya'da gerçekleştirmektedir. Bu durumun özellikle Çin'in 2010 sonrası dönemde benimsemiş olduğu ciddi politika değişiklikleriyle (yenilenebilir enerji yatırımlarındaki dünya lideri konumu, temiz teknolojiler, karbon nötr hedefi ve emisyon ticaret sisteminin kurulması gibi) yeşil dönüşüm sürecini hızlandırması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Politika değişikliklerinin Çin'in yeşil dönüşümüne yansıdığı GTFEE'deki nicel göstergelerdeki artışlarla desteklenmektedir. Bu bulgu, Çin'de yeşil enerji verimliliği açısından önemli ve kademeli bir iyileşme yaşandığı ve ülkede yeşil enerji verimliliğinin sürekli artan bir eğilim yerine yavaşça azalan ve dalgalı bir eğilim gösterdiğini savunan Zhan ve Tan (2016), Meng ve Qu (2022) ve Zhuang vd, (2022)'nin çalışmalarının bulgularıyla benzerlik taşımaktadır. Yeşil enerji verimliliği performansının en yüksek olduğu Çin, Ember (2023) verilerine göre; 2023 yılı itibarıyla küresel yenilenebilir elektrikliğin %32'sini üretirken, yeşil enerji verimliliği açısından onu takip eden Hindistan ve Brezilya yenilenebilir enerji kaynaklı küresel elektrik üretimine sırasıyla %4,3 ve %7,0 oranında katkı sağlamıştır. Dolayısıyla görece olarak daha yüksek yeşil enerji verimliliği iyileşmelerinin bu ülkelerde ortaya çıkması temiz enerji geçişiyle açıklanabilir. Çünkü, BRICS ülkelerinde yenilenebilir enerji santrallerinin kurulu kapasitelerindeki artışın CO<sub>2</sub> emisyon artışlarını yavaşlatabileceği, bunun ise BRICS ülkelerinin kapsayıcı yeşil kalkınmasına ve çevresel sürdürülebilirliğine katkıda bulunabileceği ampirik olarak pek çok çalışma tarafından kanıtlanmıştır (Akram, Majeed, Fareed, Khalid & Ye, 2020; Zakharov & Simonova, 2023; Yadav, Gyamfi, Asongu, & Behera, 2024; Neffati & Khemiri, 2025). Yeşil enerji verimliliğinin gelişiminin temiz ve yenilenebilir enerji kullanımıyla ilişkili olduğu Rusya'nın performansı ile de desteklenmektedir. Çünkü Rusya, Our World in Data (2024) verilerine göre; 2023 yılı itibarıyla birincil enerji tüketiminin %87,46'sını halen fosil yakıtlardan karşılamaktadır. Dolayısıyla ülkenin fosil yakıt kaynaklarına dayalı enerji bileşimi yeşil enerji verimliliğinin gelişiminin önündeki en önemli engeldir ve bu durum ülkenin BRICS içerisinde en düşük performansa sahip olmasına neden olmaktadır.

BRICS ülkeleri içerisindeki tüm ülkelerin ve ülke ortalamalarının yeşil enerji verimliliğinin gelişiminin iyileşme yönünde olması yeşil ekonomiye geçiş açısından önemli bir göstergedir. BRICS ülkelerinin "yeşil enerji" alanında karşılıklı işbirliği büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak bu durum, enerji dengesinde "yeşil enerji"nin yüksek payının yanı sıra bu alandaki etkili devlet programlarıyla ilişkilidir (Podoba & Kryshneva, 2018, s.17). Bu kapsamda 2015 yılında Moskova'da BRICS Enerji Verimliliği ve Tasarrufu Çalışma Grubu'nun faaliyetleriyle yürütülen ortak bir politika belgesi imzalanmıştır. Böylelikle üye ülkeler; enerji verimliliği konusunda ilerleme kaydetme, kaynakları koruma ve iklim değişikliğiyle mücadele etme taahhütlerini yineleyerek ortak araştırma ve teknoloji geliştirme, teknoloji transferi ve kapasite geliştirme, politika paylaşımı ve yenilenebilir enerjiye yatırım yapılması gibi konularda işbirliğini güçlendirmeyi ve SDG hedeflerine ulaşmayı amaçlamaktadır (International Institute for Sustainable Development, 2017).

**Tablo 3.** GTFEE ve Bileşenlerine ait Yıllık Ortalamaların Özeti

Yıl	EFFCH	TECHCH	PECH	SECH	GTFEE
1996	1,039	0,800	1,062	0,979	0,832
1997	1,079	1,121	0,975	1,107	1,210
1998	1,076	1,115	1,029	1,046	1,199
1999	0,977	1,067	1,000	0,977	1,042
2000	1,033	1,211	1,000	1,033	1,250
2001	1,023	0,666	1,000	1,023	0,681
2002	0,960	1,650	1,000	0,960	1,584
2003	1,004	1,160	1,000	1,004	1,164
2004	0,399	1,451	0,417	0,956	0,579
2005	2,200	0,425	1,962	1,121	0,934
2006	0,987	1,198	0,992	0,995	1,183
2007	1,072	1,137	1,085	0,988	1,219
2008	1,152	0,950	1,134	1,015	1,094
2009	0,746	1,408	0,945	0,789	1,049
2010	0,977	0,886	0,773	1,264	0,866
2011	0,988	1,300	0,987	1,001	1,284
2012	0,991	0,927	0,992	0,999	0,918
2013	1,406	1,133	1,397	1,006	1,592
2014	0,787	1,461	1,000	0,787	1,150
2015	1,270	0,560	1,000	1,270	0,711
2016	1,000	1,064	1,000	1,000	1,064
2017	1,000	1,662	1,000	1,000	1,662
2018	1,000	1,215	1,000	1,000	1,215
2019	1,000	0,687	1,000	1,000	0,687
2020	1,000	0,978	1,000	1,000	0,978
2021	1,000	1,654	1,000	1,000	1,654
2022	1,000	0,817	1,000	1,000	0,817
2023	1,000	1,242	1,000	1,000	1,242

Tablo 3, yeşil toplam faktör enerji verimliliği (GTFEE)'nin bileşenleri olan verimlilik değişimi (EFFCH) ve teknik değişim (TECHCH) ile verimlilik değişiminin alt bileşenleri olan saf verimlilik değişimi (PECH) ve ölçek verimlilik değişimi (SECH) hakkında kapsamlı bir genel bakış sunmaktadır. Buna göre, BRICS ülke ortalamasında 2001, 2004, 2005, 2010, 2015, 2019, 2020 ve 2022 yılları hariç olmak üzere diğer tüm dönemlerde yeşil enerji verimliliği artmıştır. Bu artışın arkasındaki kaynaklara odaklanıldığında, GTFEE'nin yalnızca 2008 ve 2013 yıllarında verimlilik artışından kaynaklandığı ve bu verimlilik artışının ise daha büyük oranda saf verimlilik artışı nedeniyle ortaya çıktığı gözlemlenmektedir. Bu durum, söz konusu bu dönemlerde teknolojik gelişmeden bağımsız olarak yönetim becerisi, süreç iyileştirme gibi nedenlerle daha verimli yeşil üretimin ortaya çıktığı anlamına gelmektedir. GTFEE açısından verimlilik artışının yaşandığı diğer tüm dönemlerde ise bu artış daha büyük oranda teknik değişim nedeniyle ortaya çıkmıştır. Ayrıca tabloda 2016-2023 döneminde verimliliğin ve alt bileşenleri olan saf ve ölçek verimliliğinin değişmediği dolayısıyla yeşil verimlilik değişiminin doğrudan teknik verimlilik değişimine bağlı olduğu açıkça görülmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, incelenen dönemde yeşil enerji verimliliği üzerinde en belirleyici etken teknolojik değişimler iken, saf verimlilik genellikle sabit kalmış ancak zaman zaman GTFEE'yi doğrudan etkileyecek kadar artmış ya da azalmıştır. Dönem içerisinde 2004 yılı her boyutta ortaya çıkan kayıplarla en verimsiz yıl olurken, 2013 yılı teknoloji ve yönetsel süreçlerle en dengeli ve verimli yıl olmuştur. 2020 sonrası yıllar ise, özellikle sabit PECH ve değişken TECHCH ile dikkat çekmekte ve bu da verimlilik artışının artık sadece teknolojiye bağlı hale geldiğini göstermektedir. Dolayısıyla BRICS ülke ortalamasında yeşil enerji verimliliğindeki iyileşmelerin büyük ölçüde teknik değişim nedeniyle arttığını söylemek mümkündür. Bu bulgu, incelenen dönemde yeşil enerji verimliliğinin yeni teknolojilere bağlı olarak (daha gelişmiş makineler, yazılımlar, ve daha yeşil teknolojiler gibi) üretim sınırının genişlemesi nedeniyle arttığına işaret etmektedir. Bu durumun, BRICS ülkelerinin yeşil teknoloji uygulamalarında ortak bir yaklaşım benimsemesiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Çünkü üye ülkeler karbon salınımını azaltmaya yönelik ürün, süreç ve hammadde kullanımı, yeşil binalar, sürdürülebilirlik ve eko-kent politikalarıyla yeşil teknolojilere yönelik ortak iş birliği faaliyetleri yürütmektedirler (Miranda, Moletta, Pedrosa, Pilatti & Picinin, 2021).

**Tablo 4.** GTFEE ve Bileşenlerine ait Ülke Ortalamalarının Özeti (1996-2023)

Ülke	EFFCH	TECHCH	PECH	SECH	GTFEE
Brezilya	1,004	1,038	1,003	1,001	1,043
Rusya	1,000	1,029	1,000	1,000	1,029
Hindistan	1,037	1,040	1,008	1,029	1,079
Çin	1,000	1,103	1,000	1,000	1,103
Güney Afrika	1,003	1,038	1,000	1,003	1,041
Ortalama	1,009	1,050	1,002	1,007	1,059

Tablo 4, BRICS üye ülkelerinin 1996-2023 dönemi ortalamasında yeşil enerji verimliliğindeki (GTFEE) gelişmelerin alt bileşenlerine ait verimlilik değişimlerini sunmaktadır. İlk olarak Brezilya'da GTFEE %4,3 oranında artmıştır ve bu artış hem verimlilik artışı (%0,4) hem de teknik gelişme (%3,8) kaynaklı ortaya çıkmıştır. Verimlilik artışı ise %0,3 oranında saf verimlilik ve %0,1 oranında ölçek etkisinden kaynaklıdır. Rusya'da, yeşil enerji verimliliğindeki artış %2,9 oranıyla tamamen teknik değişimden kaynaklı ortaya çıkmıştır. Hindistan'ın GTFEE'si %7,9 oranında artış sağlamış ve bu artış %0,8 ile saf verimlilik, %2,9 ile ölçek verimliliğinden kaynaklanmıştır. Ayrıca Hindistan'da teknolojik gelişme de %4,0 oranında yüksek bir gelişim göstermiş dolayısıyla Hindistan'ın yeşil enerji verimliliği çok yönlü bir gelişim göstermiştir. Çin ise %10,3 GTFEE artışıyla teknolojiye dayalı en büyük gelişimi yaşayan ülke konumundadır. Çin'de hiçbir içsel verimlilik artışı (effch, pech, sech = 1,000) olmaması iyileşmenin tamamen teknoloji kaynaklı olduğuna işaret etmektedir. Güney Afrika'nın GTFEE'de ortaya çıkan %4,1'lik artış ise hem teknoloji (%3,8) hem de küçük bir ölçek verimliliği (%0,3) artışına dayanmaktadır.

Ortalama değerler açısından bakıldığında, ülkelerin yeşil toplam faktör enerji verimliliği incelenen dönemde %5,9 oranında artmıştır. Bu artışın %5,0'i teknolojik gelişmeler kaynaklı ortaya çıkarken, %0,9'luk artış verimlilik kaynaklı olmuştur. Verimlilik iyileşmesi ise, %0,7 oranında ölçek verimlilik değişiminden, %0,2 oranında ise saf verimlilik değişiminden kaynaklanmıştır. Bu bulgu, ülkelerin üretim ölçeklerini daha verimli kullanmaya başladıklarına ancak yönetsel gelişmelerin çok sınırlı olduğuna işaret etmektedir. Dolayısıyla ulaşılan bulgular, incelenen dönemde BRICS ülkelerinin yeşil enerji verimliliğinde ortaya çıkan artışların itici gücünün teknoloji değişimi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

## Sonuç

Ekonomiler gelişmişlik seviyelerinden bağımsız olarak büyük ölçüde büyüme hedeflerine odaklanmaktadır. Büyüme; sermaye, emek ve enerji gibi girdilerle daha yüksek çıktı üretme anlamına gelmektedir. Ancak bu girdiler içerisinde özellikle doğal kaynaklar olarak enerji, kirli fosil yakıtlara dayandığı sürece çevre üzerinde geri dönülemez büyük tahribatlar yaratmaktadır. Diğer bir ifadeyle sürekli büyüme hedefleri için çıktı yaratma sürecinde çevre ve ekonomi arasında bir değiş-tokuş (trade-

off) ilişkisi ortaya çıkmaktadır. Ancak çevrenin bozulması ve doğal kaynakların tükenmesi pahasına ortaya çıkan bir büyüme anlayışı sürdürülebilir değildir. Bu kapsamda ortaya çıkan yeşil büyüme modeli, çıktı yaratırken çevre üzerindeki baskının minimum düzeye indirildiği eş zamanlı bir büyüme anlayışını savunmakta ve çevresel sürdürülebilirliğe odaklanmaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik, en genel hatlarıyla toplumların ihtiyaçlarını karşılarken ekosistemlerin kapasitesinin aşılmadığı ve insan faaliyetlerinin biyolojik çeşitliliği azaltmadığı bir denge durumunu ifade etmektedir. Bu kapsamda pek çok ekonomi artık yeşil ekonomiye doğru bir dönüşümü benimsemekte ve yalnızca çıktı üretimini değil doğal kaynaklar, ekonomi ve ekoloji arasındaki dengeyi göz etmeye çalışmaktadırlar. Bu dengenin sağlanması büyük ölçüde ülkelerin enerji bileşimine yönelik yeni yaklaşımlara dayandığından, yeşil büyüme aynı zamanda “yeşil enerjiye” geçişi ima etmektedir. Birleşmiş Milletler, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması için yeşil enerjiye dönüşümün ve enerji verimliliğinin artmasının kritik derecede önemli olduğunu vurgu yapmaktadır.

Yeşil enerji verimliliği, sadece bugünün değil, geleceğin de kaynaklarını korumak için çevresel sürdürülebilirliğin en temel bileşenidir. Yeşil enerji verimliliğiyle daha az kaynakla daha çok üretim ve daha az kirlilikle daha çok refah mümkün olabilir. Bu çalışmada, 1995-2023 döneminde BRICS ülkelerinde yeşil enerji verimliliğinin gelişimi ve bunun temel bileşenlerine dayalı kapsamlı bir analiz sunmak amaçlanmıştır. Söz konusu bu ülkeler, dünyanın en büyük enerji tüketicileri ve enerji üreticileri olmasının yanı sıra aynı zamanda en büyük CO<sub>2</sub> yayıcıları arasında yer almaktadır. Diğer taraftan bu ülkeler enerji verimliliği, temiz enerji, yeşil teknolojiler ve iklim hedefleri gibi pek çok alanda ortak işbirlikleriyle yeşil dönüşüme doğru somut adımlar atmaktadır. Ek olarak, BRICS ülkelerinin söz konusu bu gelişmelerini dikkate alarak yeşil enerji verimliliğinin gelişimini ve kaynaklarını değerlendiren sınırlı literatür çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır. Çalışmada hem enerji girdisinin emek ve sermaye girdileriyle olan ikame etkilerini dikkate alması nedeniyle hem de çevre üzerindeki baskıyı istenmeyen çıktı olarak modele dâhil edebilmesi nedeniyle veri zarflama analizine dayalı Malmquist toplam faktör verimliliği endeksi kullanılmıştır. Ampirik bulguları şu şekilde özetlemek mümkündür: (i) Bazı dönemlerde azalış göstermekle birlikte incelenen dönem ortalamasında beş BRICS ülkesinin de yeşil toplam faktör enerji verimliliği artmıştır. (ii) 1996’dan 2023 yılına kadar geçen sürede Brezilya’nın yeşil enerji verimliliği ortalama 1,043, Rusya’nın 1,029, Hindistan’ın 1,079, Çin’in 1,103, Güney Afrika’nın 1,041 ve beş ülkenin ortalamasında ise 1,102 olarak gerçekleşmiştir. Buna göre, yeşil enerji verimliliği açısından en iyi performansı Çin sergilerken; onu sırasıyla Hindistan, Brezilya, Güney Afrika izlemekte, en düşük yeşil enerji verimliliği ise Rusya’da gerçekleşmektedir. (iii) Yeşil enerji verimliliğindeki gelişmeler bileşenlerine ayrılıp incelendiğinde, BRICS ülke ortalamasında yeşil enerji verimliliğindeki iyileşmelerin büyük ölçüde teknik değişim nedeniyle ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. (iv) Son olarak, yeşil enerji verimliliğindeki gelişmeler ülkeler bazında ayrıştırılıp incelendiğinde beş ülkenin de yeşil enerji verimliliğinde ortaya çıkan artışların itici gücünün yine teknik değişim olduğu gözlemlenmiştir.

Bu bulgular bazı kritik ve önemli noktalara işaret etmektedir. İlk olarak, BRICS ülkelerinin yeşil enerji verimliliğindeki iyileşmeler, bu ülkelerin düşük karbonlu enerji sistemlerine yöneldiğinin ve ekonomik yapının yeşil dönüşümünün bir göstergesidir. İkinci olarak, BRICS ülkeleri içerisinde %10,3 oranında yüksek bir artışla Çin’in yeşil enerji verimliliği performansı açısından ön plana çıkması, ülkenin yenilenebilir enerji kapasitesinin artırılması, elektrifikasyon ve altyapı yatırımları, yeşil finansman, 2060 yılına kadar karbon nötr hedefi gibi politikalarının çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik büyüme açısından olumlu sonuçlar doğurduğunu kanıtlamaktadır. Rusya ise, enerji bileşiminde büyük ölçüde hala fosil yakıtlara bağımlı olduğundan yeşil enerji verimliliği açısından %2,9’luk artışla en düşük performansı göstermektedir. Bu bulgu, yeşil enerji verimliliği önündeki en büyük engelin fosil yakıtlara bağımlı bir enerji yapısı olduğunu doğrulamaktadır. Diğer taraftan BRICS ülkeleri içerisindeki en büyük ekonomi olan Çin, yatırım gücü, teknolojik kapasitesi ve yeşil enerji üretimindeki ölçeğiyle diğer BRICS ülkeleri için doğal bir referans noktası oluşturabilir. Mevcut durumda, BRICS ülkeleri, enerji verimliliği ve iklim değişikliği, yeşil dönüşüm ve yeşil teknolojiler gibi konularda işbirliği yaparak ortak politikalar da benimsemektedir. Tüm BRICS üye ülkelerinin yeşil enerji verimliliği açısından gelişme göstermesi bu ortak politika girişimlerinin olumlu ve önemli bir sonucudur. Son olarak dikkat edilmesi gereken en çarpıcı noktalardan biri, üye ülkelerde yeşil enerji verimliliğinin iyileşmesi hem ortalamada hem de ülke bazında ölçek büyümesinden, yönetsel becerilerden, süreç optimizasyonu

gibi değişmelerden ziyade büyük ölçüde teknik değişim kaynaklı ortaya çıkmıştır. Bu durum BRICS ülkelerinin, yeşil enerjiye geçişinin çoğunlukla 2000'li yıllardan sonra hızlanmasıyla ve yenilenebilir teknolojilere (güneş, rüzgâr, biyokütle gibi) geçişin, doğrudan üretim sınırını yukarı çekerek verimlilik artışı sağlamasıyla ilişkilidir. Ek olarak, bu ülkelerdeki düşük başlangıç verimliliği, hızlı teknoloji ithali, devlet politikalarının teknolojiye odaklanması ve işletme/yönetim verimliliğinin görece daha az etkili olması da üye ülkelerde yeşil enerji verimliliğindeki artışın büyük kısmının teknik değişim nedeniyle ortaya çıkmasında etkili faktörlerdir.

BRICS ülkelerinin yeşil enerji verimliliği konusundaki iyileşmeleri, küresel ölçekte önemli öngörüler sunabilir. Bunun temel nedeni, BRICS'in yalnızca bölgesel değil, küresel enerji tüketimi, üretimi ve karbon emisyonları açısından belirleyici aktörler arasında yer almasıdır. Eęer BRICS ülkeleri yeşil enerji verimliliğinin artışıını sürdürülebilirlerse, yeşil kalkınmanın yalnızca gelişmiş ülkeler için değil, gelişmekte olan ülkeler için de uygulanabilir olduğu ispatlanabilir. Böylelikle yeşil enerji verimliliğindeki ilerlemeler, iklim taahhütlerinin daha iddialı hale gelmesini ve finansal kaynakların artmasını sağlayabilir. BRICS ülkeleri yeşil toplam faktör enerji verimliliğini daha da artırmak ve sürdürülebilirliğini sağlamak için, sadece teknik değişimle yetinmemeli; bunun yanı sıra yönetsel, finansal, eğitimsel ve yapısal reformlara da odaklanmalıdır. Bunların içerisinde, yeşil teknoloji ar-ge için yerli üretim teşvikleri, kamu-özel sektör işbirlikleri, enerji verimliliği mevzuatlarının zorunlu hale getirilmesi, yeşil finansman mekanizmalarının geliştirilmesi, karbon fiyatlandırması ve emisyon ticaret sistemi, yönetim ve kurumsal koordinasyon gibi alanlarda iyileştirmelere de odaklanılmalıdır.

## Kaynaklar

AKRAM, R., MAJEED, M. T., FAREED, Z., KHALID, F., & YE, C. (2020). Asymmetric effects of energy efficiency and renewable energy on carbon emissions of BRICS economies: evidence from nonlinear panel autoregressive distributed lag model. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 18254-18268. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08353-8>

BRICS Energy Report (2020). BRICS Energy Research Cooperation Platform.

CAMIOTO, F. D. C., REBELATTO, D. A. D. N., & ROCHA, R. T. (2016). Energy efficiency analysis of BRICS countries: A study using Data Envelopment Analysis. *Gestão & Produção*, 23, 192-203. <http://doi.org/10.1590/0104-530X1567-13>

CAVES, D. W., CHRISTENSEN, L. R., & DIEWERT, W. E. (1982). The economic theory of index numbers and the measurement of input, output, and productivity. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1393-1414. <https://doi.org/10.2307/1913388>

CHEN, C., LAN, .Q, GAO, M., & SUN, Y. (2018). Green total factor productivity growth and its determinants in China's industrial economy. *Sustainability*, 10(4), 1052. <https://doi.org/10.3390/su10041052>

COELLI, T. J., & RAO, D. P. (2003). *Total factor productivity growth in agriculture: a Malmquist index analysis of 93 countries, 1980-2000*. International Association of Agricultural Economics (IAAE) Conference in Durban, Working Paper Series No:02.

COELLI, T.J. (1996). A Guide to DEAP Version 2,1: A Data Envelopment Analysis (Computer) Program. *CEPA Working Papers*, 96(08), 1-49.

DONG, Y., & HAUSCHILD, M.Z. (2017). Indicators for environmental sustainability. *Procedia Cirp*, 61, 697-702. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.173>

EMBER. (2023). Yearly Electricity Data. <https://ember-energy.org/data/yearly-electricity-data/>

ENERDATA (2024). World Energy & Climate Statistics- Yearbook 2024 <https://yearbook.enerdata.net/>

ENERGY INSTITUTE (2024). Statistical Review of World Energy. <https://www.energyinst.org/statistical-review/home>

FÄRE, R., GROSSKOPF, S., NORRIS, M., & ZHANG, Z. (1994). Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries. *The American Economic Review*, 66-83.

GILLINGHAM, K., NEWELL, R. G., & PALMER, K. (2009). Energy efficiency economics and policy. *Annual Review of Resource Economics*, 1(1), 597-620. <https://doi.org/10.1146/annurev.resource.102308.124234>

GOODLAND, R. (1995). The concept of environmental sustainability. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1-24.

HAMID, S., WANG, Q., & WANG, K. (2025). The spatiotemporal dynamic evolution and influencing factors of agricultural green total factor productivity in Southeast Asia (ASEAN-6). *Environment, Development and Sustainability*, 27(1), 2469-2493. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03975-7>

HE, Q., HAN, Y., & WANG, L. (2021). The impact of environmental regulation on green total factor productivity: An empirical analysis. *Plos One*, 16(11), e0259356. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259356>

HERRING, H. (2006). Energy efficiency-a critical view. *Energy*, 31(1), 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.04.055>

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.2005.06.015>

HUSSAIN, M., & DOGAN, E. (2021). The role of institutional quality and environment-related technologies in environmental degradation for BRICS. *Journal of Cleaner Production*, 304, 127059. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127059>

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (2017). BRICS Countries Cooperate on Energy Efficiency. <https://sdg.iisd.org/>

LEE, C. & OGATA, S. (2025). Analysis of green total factor energy efficiency in OECD Countries based on a super-efficiency SBM-DEA model. *International Journal of Economy, Energy and Environment*, 10(2), 31-45. <https://doi.org/10.11648/j.ijeee.20251002.12>

LI, X., & MA, D. (2021). Financial agglomeration, technological innovation, and green total factor energy efficiency. *Alexandria Engineering Journal*, 60(4), 4085-4095. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.001>

MA, D., GUO, Z., XIAO, Y., ZHANG, F., PENG, G., ZHANG, J., & AN, B. (2024). Is the green total factor of energy efficiency rising or falling? Evidence from the Belt and Road Initiative Countries. *Energy Technology*, 12(5), 2301163. <https://doi.org/10.1002/ente.202301163>

MENG, M., & QU, D. (2022). Understanding the green energy efficiencies of provinces in China: A Super-SBM and GML analysis. *Energy*, 239, 121912. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121912>

MIRANDA, I. T. P., MOLETTA, J., PEDROSO, B., PILATTI, L. A., & PICININ, C. T. (2021). A review on green technology practices at BRICS countries: Brazil, Russia, India, China, and South Africa. *Sage Open*, 11(2). <https://doi.org/10.1177/21582440211013780>

NEFFATI, M., & KHEMIRI, I. (2025). Examining the factors enhancing green growth in BRICS economies: Interplay between economic globalization, renewable energy use, and government efficiency. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 15(2), 735-745. <https://doi.org/10.32479/ijeep.18428>

OUR WORLD IN DATA. (2024). Russia: Energy Country Profile. <https://ourworldindata.org/energy/country/russia>

PATTERSON, M. G. (1996). What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377-390. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)

PODOBA, Z. & KRYSHNEVA, D. (2018). Green energy in BRICS. *World Economy and International Relations*, 62(2), 17-27. [10.20542/0131-2227-2018-62-2-17-27](https://doi.org/10.20542/0131-2227-2018-62-2-17-27)

REN, Y. (2020). Research on the green total factor productivity and its influencing factors based on system GMM model. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11(9), 3497-3508. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01472-2>

- SADJADI, S. J., & OMRANI, H. (2008). Data envelopment analysis with uncertain data: An application for Iranian electricity distribution companies. *Energy Policy*, 36(11), 4247-4254. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.004>
- SCOONES, I. (2007). Sustainability. *Development in Practice*, 17(4-5), 589-596. <https://doi.org/10.1080/09614520701469609>
- STATISTA (2025). Economy & Politics, Economy <https://www.statista.com/>
- SUN, X. (2022). Analysis of green total factor productivity in OECD and BRICS countries: based on the Super-SBM model. *Journal of Water and Climate Change*, 13(9), 3400-3415. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.149>
- UNITED NATIONS (2015). Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/goals>
- WILKINSON, A., HILL, M., & GOLLAN, P. (2001). The sustainability debate. *International Journal of Operations & Production Management*, 21(12), 1492-1502. <https://doi.org/10.1108/01443570110410865>
- WORLD BANK (2025). World Development Indicators. Databank. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>
- WU, H., HAO, Y., & REN, S. (2020). How do environmental regulation and environmental decentralization affect green total factor energy efficiency: Evidence from China. *Energy Economics*, 91, 104880. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104880>
- YADAV, A., GYAMFI, B. A., ASONGU, S. A., & BEHERA, D. K. (2024). The role of green finance and governance effectiveness in the impact of renewable energy investment on CO<sub>2</sub> emissions in BRICS economies. *Journal of Environmental Management*, 358, 120906. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120906>
- ZAFAR, A. (2024). The role of artificial intelligence in environmental sustainability. *Frontiers in Artificial Intelligence Research*, 1(02), 329-372.
- ZAKHAROV, V., E., & SIMONOVA, M. D. (2023). Green energy of the BRICS countries: The driver of inclusive development. in *Current Problems of the Global Environmental Economy Under the Conditions of Climate Change and the Perspectives of Sustainable Development* (pp. 323-336). Cham: Springer International Publishing.
- ZHANG, C., & WANG, Z. (2023). Analysis of spatiotemporal difference and driving factors of green total factor energy efficiency in RCEP members: Insights from SBM-GML and Tobit models. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), 15623-15640. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23270-8>
- ZHANG, C., ZHU, H., & LI, X. (2024). Which productivity can promote clean energy transition-total factor productivity or green total factor productivity?. *Journal of Environmental Management*, 366, 121899. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121899>
- ZHANG, J., & TAN, W. (2016). Study on the green total factor productivity in main cities of China. *Zbornik Radova Ekonomskog Fakulteta U Rijeci: Časopis Za Ekonomsku Teoriju I Praksu*, 34(1), 215-234. doi: 10.18045/zbefri.2016.1.215
- ZHANG, X. P., CHENG, X. M., YUAN, J. H., & GAO, X. J. (2011). Total-factor energy efficiency in developing countries. *Energy Policy*, 39(2), 644-650. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.10.037>
- ZHU, Z., & ZHENG, Y. (2020). Green total factor energy efficiency in China and its influencing factors. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 15(5), 781-787. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.150521>
- ZHUANG, W., WANG, Y., LU, C. C., & CHEN, X. (2022). The green total factor productivity and convergence in China. *Energy Science & Engineering*, 10(8), 2794-2807. <https://doi.org/10.1002/ese3.1168>

## Summary

*In the pursuit of economic development, countries-regardless of their level of advancement-have historically prioritized growth objectives. Economic growth is generally defined as the process of producing more output using inputs such as capital, labor, and energy. However, the use of fossil fuel-based energy sources has caused significant and often irreversible damage to the environment, thus creating a fundamental trade-off between economic expansion and ecological sustainability. This trade-off challenges the long-term viability of conventional growth models that ignore environmental degradation and resource depletion. In response, the concept of green growth has emerged, promoting a growth paradigm that minimizes environmental pressure while maintaining output levels. Green growth aims to balance economic performance with environmental sustainability, which entails meeting present societal needs without surpassing ecological thresholds or compromising biodiversity. In line with this transformation, many economies are now shifting towards green economies, integrating economic, environmental, and resource considerations into development strategies. Central to this transformation is the shift toward green energy and improved energy efficiency, both of which are emphasized by the United Nations as essential for achieving sustainable development. Green energy efficiency enables societies to produce more with fewer resources and lower emissions, serving as a cornerstone of sustainable energy systems.*

*This study provides a comprehensive analysis of green total factor energy efficiency across BRICS countries (Brazil, Russia, India, China, and South Africa) over the period 1995-2023. These countries represent some of the world's largest energy consumers, producers, and CO<sub>2</sub> emitters, but have also initiated cooperative efforts in areas such as clean energy, green technologies, and climate policy. The research addresses a notable gap in the literature by focusing on the sources and trends of green energy efficiency in these emerging economies. The study employs the Malmquist Total Factor Productivity Index based on Data Envelopment Analysis (DEA), which allows for the inclusion of undesirable outputs (e.g., emissions) and considers the substitutability of energy with capital and labor. Empirical results indicate a 10.2% average improvement in green energy efficiency across BRICS countries during the study period. China achieved the highest increase (10.3%), driven by significant investments in renewable energy, electrification, green finance, and its carbon neutrality goal for 2060. Conversely, Russia recorded the lowest improvement (2.9%), largely due to its continued dependence on fossil fuels. The analysis also finds that the primary driver of efficiency gains in all countries is technological change, rather than management or scale efficiency.*

*These findings underscore the broader implications of green energy transitions in major emerging economies. If sustained, the progress made by BRICS countries can demonstrate that green development is not exclusive to advanced economies. Furthermore, green energy efficiency improvements can enhance global climate ambition and attract greater financial resources. To ensure long-term sustainability, BRICS countries must go beyond technological upgrades and implement structural reforms, including domestic R&D support, green finance mechanisms, carbon pricing, and stronger governance coordination. These efforts will be vital in positioning green energy efficiency as a key pillar of low-carbon economic development on a global scale.*