

Araştırma Makalesi / Research Article

İYE VE BDT ÜLKELERİNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM, DİJİTAL UÇURUM, EKONOMİK GELİŞME, CO₂ EMİSYONLARI VE YENİLENEBİLİR ENERJİNİN İLİŞKİLENDİRİLMESİ

Resul TELLİ¹ 

ÖZET

Küresel ekonominin en kritik konuları arasında sera gazı emisyonları, dijital dönüşüm ve yenilenebilir enerji bulunmaktadır. Bu konuların dünyaya etkilerinin araştırılması Birleşmiş Milletler (BM) Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ile birlikte yeşil çevrenin korunmasında kritik öneme sahiptir. Fakat bunların akademik çevrelerce birbirinden bağımsız ele alınması söz konusu ilişkisinin sosyo-ekonomik etkilerinin tam olarak anlaşılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle hazırlanan bu çalışma, 23 yıllık dönemde (2000-2023) İleri Yükselen Ekonomiler (İYE) ve Bağımsız Devletler Topluluğu (BDT) geçiş ekonomilerinde dijital dönüşüm, dijital uçurum ve yenilenebilir enerji ile CO₂ emisyonları arasındaki karmaşık ilişkiyi incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada iki aşamalı analiz metodu kullanılmıştır. Birinci aşamada Uygulanabilir Genelleştirilmiş En Küçük Kareler (GEKK) metodu kullanılırken ikinci aşamada Veri Zarflama Analizi (VZA) ile birlikte VZA tabanlı Malmquist İndeksi (MI) metodu kullanılmıştır. GEEK’de yenilenebilir enerjinin CO₂ emisyonları üzerinde ters U şeklinde bir etkisinin olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte CO₂ emisyonlarını dijital dönüşüm ve yenilenebilir enerji kullanım artışı azalırken, dijital uçurumun negatif etkilediği tespit edilmiştir. VZA skorlarında ise Karar Verme Birimlerinde belirli dönemler için etkin üretimden sapmalar belirlenmiştir. MI hesaplamalarında ise BDT ülkelerine kıyasla İYE ülkelerinin CO₂ emisyonları ve dijital uçurumu azaltmada yüksek verimliliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada varılan sonuçlar sürdürülebilir ekonomik kalkınma sürecinde politika yapıcılara önemli bir rehber niteliği taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dijital Dönüşüm, Dijital Uçurum, Ekonomik Gelişme, CO₂ emisyonları, Yenilenebilir Enerji.

JEL Sınıflandırması: O33, O44, O47, Q56

ASSOCIATING DIGITAL TRANSFORMATION, DIGITAL GAP, ECONOMIC DEVELOPMENT, CO₂ EMISSIONS AND RENEWABLE ENERGY IN AEE AND CIS COUNTRIES

ABSTRACT

Greenhouse gas emissions, digital transformation, and renewable energy are among the most critical issues in the global economy. Investigating the effects of these issues on the world is critically important in protecting the green environment together with the United Nations (UN) Sustainable Development Goals. Therefore, the study aims to examine the complex relationship between digital transformation, digital divide and renewable energy and CO₂ emissions in the transition economies of

¹ Öğr. Gör. Dr., Çukurova Üniversitesi, Pozantı MYO, Adana, Türkiye, rtelli@cu.edu.tr

Advanced Emerging Economies (AEE) and Commonwealth of Independent States (CIS) in the period 2000-2023. In the study, the Feasible Least Squares (FGLS) method was used in the first stage, while the DEA-based Malmquist Index (MI) method was used together with Data Envelopment Analysis (DEA). For FGLS, it was determined that renewable energy had an inverted U-shaped effect on CO₂ emissions. However, while digital transformation and renewable energy use reduce CO₂ emissions, it was determined that the digital divide had a negative effect. MI calculations, it was determined that ESE countries had high efficiency in reducing CO₂ emissions and the digital divide compared to CIS countries. The results of the study are an important guide for policy makers in the sustainable economic development process.

Keywords: Digital Transformation, Digital Divide, Economic Development, CO₂ emissions, Renewable Energy.

JEL Classification Codes: O33, O44, O47, Q56

EXTENDED SUMMARY

Research Questions & Purpose

Digital transformation, technological advancement, and energy are among the most extensively studied topics in sustainable development (Hofer, 1975; Vial, 2021; Gong & Ribiere, 2021). The results of these studies show the complex and uncertain effects of digital transformations on economic growth and environmental risks (Hinings et al., 2018; Beier et al., 2020). The Environmental Kuznets Curve (EKC), established by the researchers Grossman & Krueger (1995), is central to this field. It proposes that greater personal income, as a development marker, eventually has an advantageous influence on the environment. (Yandle et al., 2002). It is argued that income growth leads to greater investments in renewable energy, fostering digital technologies that shift societal demand toward less CO₂-intensive sectors like services (Abbas et al., 2023; Shah & Ximei, 2024). On the other hand, these “smart” digital technologies could increase energy demand in sectors like manufacturing. Therefore, a circular digital economy must be supported by government policies that efficiently manage natural resources and address the growing demand for sustainable energy use (Yao et al., 2019; Ben Jebli et al., 2019; Ionaşcu et al., 2022). This study focuses on the role of digital transformation, the digital divide, and renewable energy in reducing CO₂ emissions. Its primary aim is to empirically investigate the relationship between digital transformation, the digital divide, economic development, and CO₂ emissions, with a specific emphasis on the regulatory impact of renewable energy use.

Literature Review

Previous studies emphasize the growing importance of renewable energy sources in ensuring the sustainability of digital transformation and reducing greenhouse gas emissions. Their critical review provides a comprehensive summary of studies examining the relationships between digital transformation, the digital divide, economic development, and CO₂

emissions. Lin & Huang (2023) and Bianchini et al. (2023), who examined the contribution of digital industries to the electricity sector in 33 countries to measure the regulatory impact of digitalization on renewable energy integration, examined the link between digital and green transformations in the UK and EU countries, and investigated the extent to which digital and environmental technologies have an impact on greenhouse gas emissions from industrial production. At the same time, Huang et al. (2024), similarly, Truong (2022), Lin & Huang (2023), Kunkel & Matthes (2020), Ma et al. (2022) and Ruiz-Mendoza & Sheinbaum-Pardo (2010) and similar studies are described in the literature section of our article.

Methodology

The study uses a two-stage analysis method. In the first phase, the applicable Generalized Least Squares (GLS) method is used, while in the second phase, the Data Envelopment Analysis (DEA) and the DEA-based Malmquist Index (MI) method. The results of the identical case studies supported our study. In this study, the moderating effect of renewable energy on the relationship between digital transformation, the digital divide, economic growth, and CO₂ emissions is analyzed using annual data from 20 economies in the AEE and CIS regions for the period 2000–2023. The variables are compiled from databases of institutions such as the World Bank and OECD. This dual approach has not been applied in this scope in the existing literature, positioning the study as a critical reference for future research. The hypotheses tested were as follows: H1: Digital transformation and renewable energy reduce CO₂ emissions. H2: The digital divide reduces the positive effect of renewable energy consumption on CO₂ emissions. H3: Renewable energy has an inverted U-shaped effect on CO₂ emissions. Employing a two-stage methodological approach- FGLS, DEA, and MI- the study provides a nuanced analysis of these interactions.

Results and Conclusions

The findings highlight a significant positive relationship between digital transformation, renewable energy use, and CO₂ emissions reduction, emphasizing the potential of digitalization in achieving ecological goals. On the other hand, it was revealed that the digital divide has negative effects on CO₂ emissions. This situation was detected at quite high rates in some years during the analysis period. Inefficient scores were calculated frequently, especially in the middle of the analysis period. MI analyses demonstrate higher efficiency in CO₂ reduction among UIC countries compared to CIS nations. Accordingly, in EIC countries, priority should be given to addressing digital divide indicators, while in CIS transition economies, efforts should focus on reducing CO₂ emissions. The study conditions show that policies for additional energy use should be at the same rate as digital transformation in DMUs. It also shows that choices are aimed at human capital policies, especially the level of education, which is the basic basis of technical efficiency and provides opportunities to minimize idle input.

1. Giriş

Enerji Ekonomisi ve Finansal Analiz Enstitüsü (IEEFA) raporuna göre dünyada 2050'ye kadar sadece Avrupa Birliği (AB) ve Birleşik Krallık ülkeleri seragazı salımlarından CO₂ emisyonunu 554 milyon ton kadar azaltmayı taahhüt etmiştir. Buna karşın halen sera gazı emisyonlarının yaklaşık %72'si (Sohag vd., 2017), dünya nüfusunun büyük bölümünü (yaklaşık %70) barındıran gelişen ekonomiler tarafından meydana getirilmektedir. Bu oran giderek artmakta olup bu ülkelerde gerekli önlemler alınmazsa, küresel sıcaklık artışlarını 2 derecenin altında tutma hedefinin tehlikeye girebileceği bilimsel araştırmalarla da ifade edilmektedir (Dincer, 2000; Dodman, 2009; Khan vd., 2014; IEEFA, 2023). Ekolojik bozulmanın önemli bir tetikleyicisi olan sera gazı emisyonları bireylerin yaşam koşullarını da doğrudan etkilemektedir. Teknolojik inovasyon ile artan enerji kullanımı, CO₂ emisyonu üzerinde kritik bir öneme sahiptir (Dodman, 2009; Nong vd., 2021). Yeşil ekonominin nihai amacı olan çevrenin korunması ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada küresel toplum mutabakat oluşturmuş ve bu konuda eylemlerde bulunma stratejileri geliştirmeye başlamıştır. Bunların temelinde ise öncelikli olarak CO₂ emisyonlarını azaltma bulunmaktadır (Xiaole & Piscunova, 2022; Li, 2024).

Artan küreselleşmenin meydana getirdiği yeküreselleşme akımı ulus devletlerde kalkınmanın sürdürülebilir kılınmasında enerji, teknoloji ve dijitalizm döngülerinin çokça incelenmesini gündemin birinci maddesinde tutmaya devam etmektedir. Bun faktörlerden dijital dönüşüm ve dijital uçurumun çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri ile ilgili çalışmalar ise özellikle 1990'larla birlikte geniş bir literatür ortaya çıkarmıştır (Hofer, 1975; Vial, 2021; Gong & Ribiere, 2021). Çalışmalarda elde edilen bulgular dijital dönüşümün ekonomik gelişme ve çevresel riskler üzerindeki etkilerinin karmaşık ve belirsiz olduğunu göstermektedir (Hinnings vd., 2018; Beier vd., 2020). Bu çalışmaların temel dayanağı olarak gösterilen Grossman & Krueger (1995)'in geliştirdiği Çevresel Kuznets Eğrisi-ÇKE (Cole vd., 1997), aslında bir kalkınma göstergesi olan kişisel gelirin artışının uzun vadede çevreyi iyileştirici etki oluşturacağını belirlemiştir (Yandle vd., 2002). Bu noktada gelir artışının yenilenebilir enerji yatırımlarını artıracak ve bunun da dijital teknolojileri geliştirerek toplumsal talebin hizmet sektörü gibi çok daha az CO₂ emisyonu üreten alanlarda yoğunlaşmasına neden olacağı vurgulanmaktadır (Abbas vd., 2023; Shah & Ximei, 2024).

Uluaslararası ekonomide enerji sektörünün rolü özellikle sürdürülebilir çevrenin sağlanmasında oldukça büyük önem oluşturmaktadır. Bu bağlamda CO₂ emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip dijital teknolojilerin geliştirilmesi enerji verimliliğinin artırılmasında kritik bir öneme sahiptir. Bu rol küresel ekonomik sisteme entegrasyon aşamasında olan az ve orta gelirli ülkeler için kritik öneme sahiptir. Çünkü bu ekonomilerde makroekonomik hedeflerin başında olan ekonomik büyümenin sağlanmasında yeşil ekonomiye dijital dönüşümün entegrasyonu sera gazı emisyonlarının azaltılması sürdürülebilir kalkınmada adeta bir miheng taşı olarak değerlendirilmektedir. Aynı zamanda bu durum bize dijital ekonomi ile reel sektör arasında doğrudan bir bağlantı bulunduğunu da göstermektedir (Daneeva vd., 2020; Ma vd., 2022; Dong vd., 2022). Dijital dönüşüm, enerji verimliliğini artırmak suretiyle CO₂ emisyonlarının azaltılmasında etkin rol oynamaktadır. Bu durumda artan bilgi hizmetleri ile dijital yönetişimden yeni bir sosyal yönetim sistemi oluşturup yeşil ve akıllı inovasyonlar vasıtasıyla enerji talebi azaltılmaktadır (Gielen vd., 2019; Sun & Ren, 2021; Adebayo vd., 2023). Bu

teknolojiler ise diğer yandan sanayinin lokomotifleri olan enerjiye olan talebin artmasında birincil neden haline gelmektedir. Bu nedenle döngüsel, dijital ekonominin, sürdürülebilir enerji kullanımına yönelik talebi, hükümetler tarafından doğal kaynakların verimli kullanılmasına yönelik yönlendirici politikalarla desteklenmelidir. (Yao vd., 2019; Ben Jebli vd., 2019; İo-naşcu vd., 2022). Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü (OECD) tanımına göre, çalışmada kullanılan “dijital uçurum” terimi bireyler, haneler, işletmeler ve farklı sosyo-ekonomik düzeylerdeki coğrafi bölgeler arasındaki bilgi ve iletişim teknolojilerine (BİT) erişim fırsatları ve internet kullanım faaliyetlerindeki fark olarak tanımlanmaktadır (OECD, 2001). Bu kapsamda bu kavram özellikle başta kişisel bilgisayarlar olmak üzere dijital ekipman ve hizmetlere erişim ve bunların kullanımı ile hem fiziksel bağlantı hem de kullanım kolaylığı açısından internete erişim kabiliyetindeki çok çeşitli sosyal farklılıkları kapsayacak şekilde kullanılmaktadır (Stevenson, 2009; Sparks, 2013; van Dijk, 2017; Helsper, 2021). Bu yönüyle yeşil çevre, yeşil ekonomi, sürdürülebilir kalkınma kapsamında bölgeler arası sosyal ve ekonomik farklılıkların ortadan kaldırılmasında dijital dönüşümle birlikte dijital uçurumun da araştırılması gerektiği anlaşılmış ve bu konuya son yıllardaki ampirik araştırmalarda önemli oranda yer verilmiştir (Qiu vd., 2023; Yue vd., 2024; Hou & Fu, 2024; Wang & Ramsey, 2024; Huang vd., 2024).

Tüm bu ayrıntılar ve nedenlerden dolayı bu çalışma ile sürdürülebilir ekonomik kalkınmanın odağındaki yeşil ekonomide yenilenebilir enerji, CO₂ emisyonu, dijital dönüşüm ve dijital uçurum konularına odaklanılmıştır. Bu nedenle çalışmanın genel amacı dijital dönüşüm, dijital uçurum, ekonomik gelişme, CO₂ emisyonları ve yenilenebilir enerji kullanımı arasındaki ilişkiyi deneysel olarak araştırmaktır. Araştırmada son yirmi üç yıl (2000-2023) için yüksek CO₂ emisyonlarına dayanarak İYE ve BDT geçiş ekonomisi ülkeleri örneklem olarak belirlenmiştir. Çalışmada iki aşamalı analiz gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, bu konuya farklı bir perspektif sunarak literatürdeki önemli bir boşluğun doldurulacağı düşünülmektedir. Diğer yandan çalışma bulguları hem politika yapıcılar hem de uygulayıcılar için önemli rehberlik sağlayacak niteliktedir. Bu yönüyle çalışmanın benzer çalışmalardan farklı olarak sunduğu iki aşamalı (GEKK ve VZA-MI) yöntem ve bulgular, mevcut literatürde ilk kez bu kapsamda ele alınmıştır. Bu nedenle çalışmanın mevcut literatürdeki eksiklerin giderilmesine katkı sunarak gelecek araştırmalar için önemli bir referans noktası oluşturacağı düşünülmektedir.

Çalışmada İYE ve BDT geçiş ekonomileri örneğinde “dijital dönüşüm, dijital uçurum, ekonomik gelişme, CO₂ emisyonları ve yenilenebilir enerji kullanımı arasında ilişki var mıdır?” sorusuna yönelik oluşturulan hipotezler birinci aşamada GEKK yöntemi kullanarak analiz edilmiştir. Bu çerçevede belirlenen çalışma hipotezleri şunlardır:

H₁: Dijital dönüşüm ve yenilenebilir enerji CO₂ emisyonlarını azaltır.

H₂: Dijital uçurum, yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki olumlu etkisini azaltır.

H₃: Yenilenebilir enerjinin CO₂ emisyonları üzerinde ters U şeklinde bir etkisi vardır.

Çalışmanın ikinci analiz bölümünde, CO₂ emisyonlarının azaltılmasında dijital dönüşüm, ekonomik gelişme ve yenilenebilir enerji etkinliğine yönelik verimlilik analizleri yapılmıştır. Bu amaçla İYE ve BDT geçiş ekonomileri çalışmada Karar Verme Birimleri (KVB) olarak belirlenerek analizde VZA ve VZA temelli MI metodu kullanılmıştır. Çalışmada İYE ve BDT geçiş ekonomilerinin CO₂ emisyonları azaltmadaki etkinlikleri yenilenebilir enerji

kullanım oranı, eğitim seviyesi, dijital dönüşüm yatırımları ve kişi başına düşen gelir girdi değişkenleri ile CO₂ emisyonları ve dijital uçurum ise çıktı değişkenleri ile değerlendirilmiştir. Bu çerçevede araştırma hipotezlerinin açıklanmasında öncelikle her bir KVB'nin ölçeğe göre sabit ve değişken girdi varsayımına göre teknik etkinlik hesaplamaları yapılarak etkinlik durumları belirlenmiştir. Daha sonra ise MI analizi ile KVB'lerin dönem boyunca hem yıl bazlı hem de yıllar arasındaki teknik, teknolojik etkinlik ve toplam faktör verimlilik değişimleri hesaplanarak hem etkinlik hem de verimlilik değişimlerinin araştırma değişkenleri üzerinden yorumlanması hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan girdi ve çıktı değişkenleri VZA kullanılarak yapılan benzer çalışmalarda kullanılan (Gao vd., 2022; Hossin vd., 2023; Cui vd., 2023; Campoli vd., 2024; Li, 2024; Zhou & Liu, 2024; Rizza, 2024; Xue vd., 2024) değişkenlerden hareketle oluşturulmuştur.

Bu kapsamda hazırlanan çalışmanın ilk bölümü olan giriş kısmı çalışmanın konusu ile ilgili kavramsal çerçeveyi çizerken aynı zamanda da konunun uygulamasına yönelik fikirler vermektedir. İkinci kısım olan literatürde araştırma konusu ile ilgili yerli ve yabancı çalışmalar benzer ve farklı yönleriyle ele alınarak açıklanmıştır. Ekonometrik analiz ve veri seti kısmında çalışmanın hipotezleri ve analiz metodu açıklanarak analiz sonuçları ve bulgular tablolar aracılığıyla gösterilmiştir. Sonuç kısmında ise çalışma bulguları yorumlanarak politika önerileri sunulmuştur.

2. Literatür Taraması

Huang vd. (2024) tarafından yapılan çalışma, Asya'nın önde gelen ekonomilerinde dijitalleşmenin yeşil inovasyonu ilerletme ve yenilenebilir enerjiye geçişi kolaylaştırmadaki rolünü araştırarak çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisine odaklanmıştır. 1990-2022 yıllarına ait veriler yardımıyla çalışmada panel regresyon analizi yapılmıştır. Analiz ile dijitalleşmenin çeşitli yüzdelik dilimlerde çevresel bozulmayı azalttığı belirlenmiş ve dijitalleşmenin yeşil inovasyon ve yenilenebilir enerji ile etkileşiminin, analize katılan ülkelerde ekolojik bozulmayı azaltmak için önemli bir etki oluşturduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sarwar vd. (2023) çalışmalarında, Afrika kıtasındaki farklı gelirlere sahip 42 ülkede küresel dijital uçurumun, ticaret açıklığının, yenilenebilir enerji tüketiminin ve ormancılığın sera gazı emisyonları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırma kapsamında 1990-2018 dönemine ait veriler kullanılarak Dumitrescu-Hurlin nedensellik ve ARDL sınır testi modeli uygulanmıştır. Çalışmada sera gazı emisyonlarından küresel dijital uçuruma, küresel dijital uçurumdan sera gazı emisyonlarına ve sera gazı emisyonundan ticaret açıklığına doğru tek yönlü bir nedensellik olduğu tespit edilmiştir. Buna göre 42 ülkede dijital uçurumdaki artışın sera gazı emisyonlarını artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Lin & Huang (2023); 2000-2019 yılları arasında 33 ülkede dijital endüstrilerin elektrik sektörüne katkısını incelemiş ve dijitalleşmenin yenilenebilir enerji entegrasyonu üzerindeki düzenleyici etkisini ölçmek için sabit etkili panel modeli kullanmıştır. Bulgular, dijitalleşmenin yenilenebilir enerji entegrasyonunu olumlu yönde etkilediğini ve bu etkinin dijital girdi %4,2659'u aştığında belirginleştiğini göstermiştir. Etki, gelişmiş ülkelerde anlamlı iken, gelişmekte olan ülkelerde istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Sonuçlar, yenilenebilir enerji gelişimi ve karbon nötrlüğüne ulaşma adına politika yapıcılara önemli tavsiyeler sunmuştur.

Bianchini vd. (2023) çalışmasında, Birleşik Krallık ve AB ülkelerinde dijital ve yeşil dönüşümler arasındaki bağlantıyı (ikiz geçiş) inceleyerek, dijital ve çevresel teknolojilerin endüstriyel üretimden kaynaklanan sera gazı emisyonları üzerinde ne derecede etki oluşturduğunu araştırmıştır. Çalışmada 2007-2016 dönemine ait sanayi sektörünün sera gazı emisyon oranları, çevresel tehdit göstergeleri ve dijital patent başvurusu gibi veriler yardımıyla Tobit Regresyon ve Enstrümantal Değişken Yaklaşımı metodu ile analiz yapılmıştır. Çalışma sonucunda çevre teknolojilerinin geliştirilmesinin sera gazı emisyonlarını azalttığı, dijital teknolojilerin geliştirilmesinin ise artırdığı belirlenmiştir.

Gao vd. (2023) çalışmasında da, 2012-2020 yılları arasında Şanghay ve Shenzhen'deki A-hisseli şirketlerin yıllık raporlarının metin analiziyle kurumsal dijital dönüşüm düzeyini ölçmekte ve dijital dönüşümün karbon emisyon yoğunluğu üzerindeki etkilerini incelemektedir. Bulgular, dijital dönüşümün teknolojik yenilik, iç kontrol ve çevresel bilgi açıklama yeteneklerini geliştirerek karbon emisyon yoğunluğunu azalttığını göstermiştir.

Abbas vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada yenilenebilir enerji, dijital ekonomi, kamu borcu ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişki araştırılmıştır. Araştırmada gelişmekte olan 20 ülkenin 2003-2021 verileri ile Westerlund panel eşbütünleşme testi, Driscoll-Kraay sağlam standart hata tahminleri ve Umitrescu-Hurlin nedensellik testi kullanılarak elde edilen bulgularda yenilenebilir enerji ve dijital ekonominin CO₂ emisyonlarını azalttığı diğer yandan kamu borcunun CO₂ emisyonlarını artırdığı tespit edilmiştir. Araştırma sonucu gelişmekte olan ülkelerin kamu borcu seviyesini yönetilebilir seviyelerde koruması ve yenilenebilir enerji ile dijitalleşmeyi de teşvik etmesi gerektiğini göstermiştir.

Truong (2022) çalışmasında, dijital dönüşüm ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Çalışmanın analizinde karma yöntem (veri toplama-nitel analiz-nitel analiz-model uygulaması) kullanılmıştır. Çalışma bulgularında dijital dönüşümün çevresel sürdürülebilirlik üzerinde bazı olumlu etkileri olduğu tespit edilmiştir. Çalışma, yapay zekâ kullanan işletmelerde enerji tüketiminde %25 azalma yaşandığı, dijital dönüşüm uygulamalarının CO₂ emisyonlarını azalttığını ve dijital teknolojilerin atık yönetimi süreçlerini optimize ederek geri dönüşüm oranını artırdığını ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda dijital dönüşüm stratejilerinin çevresel sürdürülebilirliği olumlu etkilediği ve ekonomik gelişmeyi destekleyen faydalar sağladığı tespit edilmiştir.

Shahbaz vd. (2022) çalışmalarında; dijital ekonomi ile enerji dönüşümü arasındaki ilişkiyi 2003-2019 dönemine ait 72 ülkenin panel verileri üzerinden incelemişlerdir. Dijital ekonominin yenilenebilir enerji tüketimi ve üretimi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bulgular, dijital ekonomideki %1'lik artışın yenilenebilir enerji tüketimini %0,021 ve üretimini %0,106 oranında artırdığını göstermektedir. Ayrıca, dijital ekonominin hükümetlerin yönetim yeteneklerini güçlendirerek enerji dönüşümünü teşvik ettiği bulunmuştur. Asimetri açısından, dijital ekonominin olumlu etkisi yüksek gelirli ülkelerde daha belirgin olup, bölgesel heterojenliklerin de etkisi görülmektedir. Bu sonuçlar, dijital ekonomi ve enerji dönüşümü arasındaki etkileşimi anlamada önemli politika çıkarımları sunmuştur.

Ma vd. (2022), yapılan çalışma ile Paris Anlaşması çerçevesinde dijitalleşme ve araştırma-geliştirme yatırımlarının Çin'in düşük karbonlu büyümeye ulaşma sürecindeki etkilerini incelemişlerdir. 2006-2017 yılları arasında 30 Çin eyaletine ait yıllık verilerle gerçekleştir-

len analiz, dijitalleşme, araştırma-geliştirme yatırımları ve karbondioksit emisyonları arasında uzun vadeli eşbütünlüşme ilişkileri ortaya koymuştur. Bulgular, dijitalleşmenin eyalet düzeyinde emisyonları azalttığını ve araştırma-geliştirme yatırımlarının, dijitalleşme ile emisyonlar arasındaki ilişkiye düzenleyici bir rol oynadığını göstermiştir. Ayrıca, ekonomik büyüme, finansal gelişme ve enerji tüketiminin emisyonları artırdığı tespit edilmiştir.

Yi vd. (2022) çalışmalarında Çin'de dijital ekonominin karbon emisyonlarını azaltma üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada yazar tarafından dijital ekonominin çevresel sürdürülebilirliğe katkısını değerlendirmek amacıyla panel regresyon modelleri ve aracılık etkisi analizleri kullanarak Çin'in farklı bölgeleri için ampirik bir inceleme yapılmıştır. Çalışma ile Çin'de dijital ekonomi ile CO₂ emisyonları arasında ters yönlü bir ilişki tespit edilmiş olup dijitalleşmenin enerji verimliliği üzerinde artırıcı etkisi ile dolaylı olarak CO₂ emisyonlarını azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışma bulgularına göre bölgesel farklılıklar da CO₂ emisyonları üzerinde önemli bir role sahiptir.

Li & Ni (2021) tarafından yapılan çalışmada 190 ülkede dijital ekonominin çevre üzerindeki etkisinin nasıl olduğu araştırılmıştır. Çalışmada ülkelerin 2005'ten 2016'ya kadar küresel panel verilerine dayalı sabit etkili regresyon analizi yapılmıştır. Çalışma bulgularında CO₂ emisyonları ile dijital ekonomi arasında ters U şeklinde, doğrusal olmayan bir ilişki olduğu ve bu ilişki Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) hipotezini desteklediği tespit edilmiştir. Bu nedenle çalışma sonucunda devletlerin sürdürülebilir çevre hedefine ulaşmak için dijital ekonominin gelişimini teşvik etmeleri gerektiği ifade edilmiştir.

Kunkel & Matthes (2020) çalışmasında Asya ve Afrika örneğinde dijital dönüşümün sanayi sektöründe çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada literatür incelemesi ve belge analizi yaklaşımı ile politika belgelerinin içerik analizi yapılarak dijital dönüşümle ilgili beklentilerle çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Çalışma sonucunda dijital dönüşümün belirli koşullar altında çevresel tehditleri azaltarak ekonomik gelişmeyi desteklediği belirlenmiştir. Ancak politika yapımcıların dijitalleşmeyi çevre dostu bir şekilde yönlendirmek için daha kapsamlı stratejiler geliştirmesi gerektiğini ve bu süreçte yerel yönetimlerin dikkate alınmasının önemi ayrıca ortaya konulmuştur.

Sezgin & Fırat (2020) çalışmalarında; Covid-19 sürecinde uzaktan eğitim ve dijital uçurum sorununu, Türkiye ve dünya örnekleri üzerinden istatistiksel verilerle incelemiştir. Eğitimde fırsat eşitsizliğini azaltmak için internetin her birey için erişilebilir olmasını sağlamak ve geniş bant internet altyapısının güçlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Öztürk (2019), çalışmasında dijital dönüşüm ve parametreleri ele alınıp, enerji sektörü üzerindeki yansımaları incelenmiştir. Bu kapsamda, çalışmanın 1. bölümünde dijital dönüşüm ve bileşenleri; 2. bölümde de enerji sektöründe dijital dönüşümün yansımaları ele alınmıştır. Çalışmanın devamında araştırma metodu, şirket çalışması bilgileri, değerlendirme ve bulgular, sonuç ve öneriler bölümleri bulunmaktadır.

Ruiz-Mendoza & Sheinbaum-Pardo (2010), çalışmalarında serbestleşme süreci bağlamında dört Latin Amerika ülkesinde elektrik üretimi için enerji tüketimiyle ilgili karbondioksit (CO₂) emisyonlarını ele almışlardır. 1990'dan 2006'ya kadar, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik santralleri kurulu güç kapasitesindeki payını azaltmış ve elektrik üretimi için enerji birimi başına CO₂ emisyonu olarak tanımlanan karbon endeksi, son yıllarda hidroelekt-

rik üretimindeki artış nedeniyle endeksin azaldığı Kolombiya hariç tüm ülkeler için neredeyse sabit kalmıştır. Makale ayrıca dört ülkede geliştirilen yenilenebilir enerji kaynaklarını teşvik etmek için yeni bir dizi politika sunmaktadır. Sonuç olarak, yeniden yapılandırmanın CO₂ emisyonlarındaki azalmayla ilgili çevresel faydalar sağlamadığı sonucuna varılmıştır.

Öztürk (2002), çalışmasında Bilgi ve İletişim Teknolojilerine (BİT) erişimde ülkeler arasındaki eşitsizlik, yani Küresel Dijital Uçurum sorunu ele almıştır. Dünya Bankası'nın gelir gruplarına göre yapılan ülke sınıflandırması ışığında, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasındaki dijital uçurum çeşitli göstergeler aracılığıyla analiz edilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında Türkiye'nin dijitalleşme bağlamındaki konumu tartışılmıştır. Çalışmanın bulguları, dijitalleşme alanında ülkeler arasında belirgin bir uçurum olduğunu ve bu eşitsizliğin, önümüzdeki yıllarda önemli bir küresel tartışma ve sorun kaynağı olacağını göstermektedir.

Yapılan literatür taramasında, dijitalleşme ve CO₂ emisyonları konularının farklı ülkeler örneği üzerinden ele alındığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yerli literatürde bu konuya dair oldukça sınırlı sayıda çalışma bulunduğu tespit edilmiştir. Dijital uçurum ise genellikle Covid-19 sonrası dönemde, özellikle eğitimle ilişkili olarak ele alınmıştır.

3. Ekonometrik Analiz ve Veri Seti

Çalışmada dijital dönüşüm, dijital uçurum, ekonomik büyüme, CO₂ emisyonları ve yenilenebilir enerji arasındaki ilişki, İYE ve BDT geçiş ekonomilerinde bulunan toplam 20 ülkenin 2000-2023 dönemlerini kapsayan yıllık verileri ile analiz edilmiştir. Değişkenler Dünya Bankası ve OECD gibi kurumların veri tabanlarından derlenmiştir.

Analiz kapsamında çalışma hipotezlerinin testi için kurulan model, (1) numaralı denklemle gösterilmektedir (Ehrlich & Holdren, 1971):

$$I_{it} = a_i P_{it}^b A_{it}^c T_{it}^d \mu_{it} \quad (1)$$

(1) numaralı denklemde;

a: Sabit terim parametresi,

b,c ve d: değişken katsayılarını,

I: Çevresel etkiyi,

P: Nüfus büyüklüğünü,

A: Refah-kişi başına gelir-seviyesini,

T: Teknoloji düzeyini

μ : Hata terimini ifade etmektedir.

Eğitim Seviyesi (ES), CO₂ emisyonları üzerinde önemli bir etken olduğu için "Nüfus, Refah ve Teknolojinin Stokastik Etkilerinin Regresyon Analizi (STIRPAT)" modeline dahil edilerek 2 numaralı denklem elde edilmiştir (Dietz & Rosa, 1997). Bu analiz, çevresel etkilerin, nüfus (Population), refah düzeyi (Affluence), ve teknoloji (Technology) gibi faktörlere dayalı olarak istatistiksel yöntemlerle nasıl şekillendiğini anlamak için kullanılır. STIRPAT modeli,

çevresel etkilerin değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri incelemesine olanak tanır ve bu ilişkilerdeki belirsizlikleri hesaba katarak stokastik bir yaklaşım sunmaktadır. Model, çevresel değişkenliklerin daha karmaşık dinamiklerini incelemek için esneklik sağlar ve bu nedenle çevre ekonomisi ve sürdürülebilir kalkınma çalışmalarında sıkça kullanılır (Schneider, 2022; Lohwasser, 2023).

$$\ln I_{it} = \ln a_i + b \ln P_{it} + c \ln A_{it} + d \ln T_{it} + \beta \ln ES + \mu_{it} \quad (2)$$

Burada:

i ($i = 1, 2, \dots, n$) ülkeleri,

t ($t = 1, 2, \dots, T$) zaman dilimini temsil etmektedir.

Çalışmada çevresel etkileri tanımlamak için bağımlı değişken olarak kişi başına düşen karbon dioksit (CO_2) emisyonu kullanılmıştır. Burada (1) numaralı IPAT denkleminde yer alan;

Refah seviyesi (A), kişi başına düşen GSYİH (GDP/k) ile

Teknoloji (T), dijital dönüşüm yatırımları ($DIJID$) ve dijital uçurum ($DIJUI$) ile

Nüfus Büyüklüğü (P), yenilenebilir enerji tüketimi ($YENI$) ile ifade edilmektedir. Ayrıca kontrol değişkeni olarak modele eğitim seviyesi (ES) eklenmiştir.

Bu çerçevede (2) numaralı denkleme yukarıdaki değişkenlerin eklenmesi ile aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$\ln CO_{2it} = a + \beta_1 \ln DIJID_{it} + \beta_2 \ln DIJUI_{it} + \beta_3 \ln YENI_{it} + \beta_4 \ln GDP/k_{it} + \beta_5 \ln ES_{it} + \mu_{it} \quad (3)$$

Birçok benzer çalışmada yenilenebilir enerji ile ekonomik kalkınma arasındaki ilişkiler farklı açılardan ele alınmış ve çarpıcı sonuçlar ortaya konulmuştur. Bu çalışmalardan birçoğu bize göstermektedir ki yenilenebilir enerji, dijital dönüşüm ile önemli bir etkileşim sergilemektedir (Cocchia, 2014; Jacobsson & Johnson, 2000; Vinuesa vd., 2020). Diğer yandan yenilenebilir enerji, dijital eşitsizlik ve ekonomik kalkınma arasında da çok yönlü bir ilişki bulunmaktadır (Zhao & Zhao, 2024; Yue vd., 2024; Misra & Srivastava, 2024; Khan, 2024). Bu kapsamda yenilenebilir enerjinin, dijital dönüşüm ve ekonomik kalkınmanın verimliliği üzerinde temel etkili faktör olduğu düşünülmektedir. Yapılan bu çalışma ise yenilenebilir enerjinin CO_2 emisyonlarının azaltılması üzerindeki faydalı etkisini ortaya koyan önceki çalışmaların bulgularını genişletmektedir. Literatürdeki bu çalışmalardan farklı olarak yenilenebilir enerjinin dijital dönüşüm, dijital uçurum ve CO_2 emisyonları arasındaki bağlantısı ekonomik kalkınma açısından ortaya konulmaktadır. Bu amaçla oluşturulan araştırma modeli (4) ve (5) numaralı denklemlerle gösterilmektedir.

$$\ln CO_{2it} = \gamma_0 + \gamma_1 \ln DIJID_{it} + \gamma_2 \ln DIJUI_{it} + \gamma_3 \ln YENI_{it} + \gamma_4 \ln GDP/k_{it} \times \ln YENI_{it} + \gamma_5 \ln ES_{it} + \psi_{it} \quad (4)$$

$$\ln CO_{2it} = \delta_0 + \delta_1 \ln DIJID_{it} + \delta_2 \ln DIJUI_{it} + \delta_3 \ln YENI_{it} + \delta_4 \ln DIJUI_{it} \times \ln YENI_{it} + \delta_5 \ln GDP/k_{it} + \xi_{it} \quad (5)$$

(4) ve (5) numaralı denklemlerde yer alan γ_0 ve δ_0 kontrol değişkenleri, ψ_{it} ve ξ_{it} , t zamanda i ülkesi için her iki modelin de hata terimi olarak ifade edilmektedir.

3.1. Panel Birim Kök Test Sonuçları

Çalışmada farklı değişkenler arasındaki ilişkiyi analiz etme sürecinde, birim köklü olup olmadığı ve geleneksel panel birim kök testlerini kullanıp kullanamayacağımızı belirlemek ve sahte regresyon sorunundan kurtulmak için yatay kesit bağımlılık testi kullanılmıştır. Serilerin durağanlık koşulu, serilerin ortalamasının ve varyansının zaman içinde değişmemesi ve iki dönem arasındaki kovaryansın yalnızca bu iki dönem arasındaki uzaklığa bağlı olmasıyla açıklanmaktadır. Bunun yanı sıra, birim kök içeren zaman serileri arasında eşbütünleşme ilişkisi bulunmuyorsa, değişkenler arasında anlamlı bir ekonomik ilişkinin varlığından söz etmek doğru olmayacaktır (Granger & Newbold, 1974; Breusch & Pagan, 1980; Gujarati & Porter, 2012; Harris & Sollis, 2003; Pesaran, 2004). Ekonometrik modelde Uygulanabilir Genişletilmiş En Küçük Kareler (GEKK) tahmincisi uygulanmıştır (Parks, 1967; Kmenta & Klein, 1971).

Tablo 1: Tanımlayıcı İstatistikler

Değişken	Mean	Median	Max.	Min.	St. Dev.
lnCO ₂	0,652	0,642	1,963	-0,120	0,401
lnDIJID	0,846	1,020	1,871	1,300	0,624
lnDIJIU	1,883	1,852	1,899	1,527	0,061
lnGDP/k	2,684	2,696	3,767	2,683	0,258
lnYENI	0,299	0,303	0,498	0,112	0,050
lnES	1,219	1,068	3,824	0,311	0,605

Mean: Ortalama, Median: Ortanca, Max: En yüksek değer, Min: En düşük değer ve St. Dev: Standart sapmayı ifade etmektedir.

Tablo 1, çalışmada yer alan 20 ülkenin CO₂ emisyonu (lnCO₂) değişkeninde logaritmik değerlerin oldukça farklılaştığını ortaya koymaktadır. Dijital dönüşüm (lnDIJID) değişkeninde yüksek değerler dikkati çekerken, standart sapma (0.624), değerinin en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Kişi başına düşen gelir (lnGDP/k) değişkenine ait logaritmik değerlerde önemli dalgalanmalar dikkati çekmektedir. Yenilenebilir enerji kullanımına ait (lnYENI) değişken düşük standart sapma ile simetrik bir dağılımın olduğunu ortaya koymaktadır. Eğitim seviyesi (lnES) değişkeninde ise en yüksek ve en düşük değerler arasındaki fark yüksek bir varyansın olduğunu göstermektedir. Değişkenler arasındaki korelasyon ilişkisi ve bu ilişkinin istatistiksel anlamlılığı Tablo 2 yardımıyla gösterilmektedir.

Tablo 2'ye göre CO₂ emisyonu ile dijitalleşme göstergesi arasında “-0.821” korelasyon değeri ile negatif yönlü ve güçlü bir ilişki tespit edilmiş olup dijitalleşmenin artmasının çevresel verimlilik üzerinde olumlu etki oluşturacağı görüşünü desteklemektedir. Diğer yandan dijital uçurum göstergesi ile “0.444” değerinde anlamlı ve pozitif yönlü bir ilişki hesaplanmıştır. Bu durumda dijital uçurum göstergesinin artması CO₂ emisyonu üzerinde olumsuz etki oluşturabilir. Bununla birlikte Tablo 2'ye göre kişi başına düşen gelir ile CO₂ emisyonu arasında korelasyon katsayısı “0.882” olarak güçlü ve anlamlı bir ilişkiyle gösterilmektedir. “-0.467” ile anlamlı ve negatif ilişki gösteren yenilenebilir enerji göstergesi, CO₂ emisyonunu azaltıcı etki potansiyelini ortaya koymaktadır. Diğer yandan yenilenebilir enerji göstergesi ile eğitim seviyesi arasında “0.349” değerinde korelasyon katsayısı ile zayıf ancak pozitif yönlü bir ilişki

olduğu görülmektedir. Tablodan dikkati çeken diğer bir sonuç ise eğitim seviyesi ile CO₂ emisyonu arasındaki pozitif yönlü ve anlamlı korelasyon (0.411) ilişkisidir.

Tablo 2: Korelasyon Matrisi

Değişkenler	lnCO ₂	lnDIJID	lnDIJIU	lnGDP/k	lnYENI	lnES
lnCO ₂	1,000					
lnDIJID	-0,821** (0,000)	1,000				
lnDIJIU	0,444*** (0,000)	-0,542*** (0,000)	1,000			
lnGDP/k	0,832** (0,000)	0,589*** (0,000)	-0,456** (0,000)	1,000		
lnYENI	-0,467*** (0,000)	0,298*** (0,000)	0,389*** (0,000)	0,761*** (0,000)	1,000	
lnES	0,411*** (0,000)	0,482** (0,018)	0,216*** (0,000)	0,663** (0,000)	0,349*** (0,000)	1,000

Not: Katsayıların istatistiksel olarak anlamlılığı sırasıyla %1, %5 ve %10 düzeylerinde (*, **, ***) ifade edilmektedir (p < 0,01).

Analizin güvenilirliğini artırmak amacıyla çalışmada kullanılan bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı testi uygulanmıştır. İlk olarak Ragnar Frisch (1934) tarafından ortaya atılan ve çoklu regresyon analizinde bağımsız değişkenlerden birinin ya da birkaçının diğer bağımsız değişkenlerle tamamen ya da tamamına yakın olarak doğrusal bir ilişki göstermesi durumu çoklu doğrusal bağlantı problemi olarak tanımlanmaktadır (Doornik vd., 2005). Çoklu doğrusal bağlantı testi için literatürde kullanılan çok çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmada çoklu doğrusal bağlantıyı (multicollinearity) ölçmek için ilk olarak Marquardt (1970) tarafından çalışmasında kullanılan VIF (Variance Inflation Factor) istatistiğinden yararlanılmıştır. Tablo 3 ile çalışmada kullanılan değişkenlerin çoklu doğrusal bağlantı test sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 3: Çoklu Doğrusal Bağlantı Test Sonucu

Değişkenler	VIF	1/VIF
lnDIJID	2,98	0,212
lnDIJIU	1,24	0,468
lnGDP/k	5,29	0,153
lnYENI	4,17	0,295
lnES	2,19	0,398
Ortalama VIF	3,17	

Not: Her bir değişken için VIF değeri 10'dan küçük, 1/VIF değeri 0,1'den büyük olmalıdır.

Tablo 3'e göre değişkenlerden en yüksek VIF değeri lnGDP/k için 5,29 iken en düşük değer lnDIJIU için 1,24 olarak hesaplanmıştır. Her iki durumda da değerler "10" değerinden küçüktür. Diğer yandan Tablo 3'te 3,17 değerindeki ortalama VIF, tüm bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı sorununun olmadığını göstermektedir. Tablo 3'te sağ sütunda gösterilen Ters VIF (1/ VIF) değerleri, bağımsız değişkenlerin bağımsızlık seviyelerini ifade etmektedir (Marquardt, 1970). Buna göre değerlerin tamamı 0,1 değerinden büyüktür. Bu durumda bağımsız değişkenler arasında herhangi bir tam bağımlılık (perfect multicollinearity) sorunu tespit edilmemiştir (Slinker & Glantz, 1985; Paul, 2006; Gwelo, 2019).

Panel veri analizlerinde ülkeler, bölgeler ya da birimler arasındaki bağımsızlık varsayımının ihlal edildiği durumlar çapraz bağımlılık ile ifade edilmektedir. Çapraz bağımlılık testi ile değişkenler üzerinden birimler arası bağlantının derecesi hesaplanmaktadır (Pesaran, 2015). Çapraz kesit bağımlılıklarını ele almak için farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. İlk nesil yöntemler (Levin & Lin, 1992-1993; Harris & Tzavalis, 1999; Choi, 2001) bootstrap gibi yöntemlerle rahatsız edici parametrelerin etkisini azaltmayı hedeflerken, O'Connell (1998), Pesaran (2003) ve Chang (2004), daha genel bir çerçevede ikinci nesil birim kök testlerini ortaya atmıştır. Bu testler, panel verideki heterojenliği ve yenilikler arasındaki bağımlılığı dikkate almaktadır (De Hoyos & Sarafidis, 2006; Pesaran, 2007; Chudik & Pesaran, 2013). Literatürde çapraz bağımlılık testi için sıkça kullanılan Pesaran testi bu çalışmada da kullanılmıştır. Tablo 4, panel veri analizinde birim kök testleri ve çapraz bağımlılık testi sonuçlarını içermektedir.

Tablo 4: İkinci Nesil Panel Birim Kök Testi ve Çapraz Bağımlılık Test Sonuçları

Değişken	CADF (Level)	CADF (First Difference)	CIPS (Level)	CIPS (First Difference)	Pesaran CD
lnCO ₂	-1,325	-4,258***	-1,520	-5,325***	30,210*** (0,000)
lnDIJID	-1,101	-2,295***	-2,001	-6,154***	74,45*** (0,000)
lnDIJIU	-2,415***	-5,658***	-5,105***	-5,511***	28,19*** (0,000)
lnGDP/k	-1,741	-3,263***	-2,528***	-4,259***	56,47*** (0,000)
lnYENI	-2,789	-3,164***	-2,004	-2,259***	35,78*** (0,000)
lnES	-3,195***	-2,124***	-1,001	-4,534***	31,63*** (0,000)

Not: Katsayıların istatistiksel olarak anlamlılığı sırasıyla %1, %5 ve %10 düzeylerinde (*, **, ***) ifade edilmektedir (p < 0,01).

Tablo 4'te CADF ve CIPS testleri kullanılarak değişkenlerin durağanlık durumları değerlendirilmiştir. Ayrıca, Pesaran CD testi ile çapraz kesit bağımlılığı analizi yapılmıştır. Birim kök testlerinin gösterildiği Tablo 4'e göre, düzeyde durağanlık (Level) sonuçlarında lnDIJIU ve lnES değişkenleri düzeyde istatistiksel olarak anlamlı durağanlık göstermekte olup diğer değişkenlerin kritik eşik düzeyini aşamadığı anlaşılmaktadır. Ancak First difference hesaplamalarında tüm değişkenlerin durağan hale geldiği tespit edilmiştir. Pesaran CD test sonuçları tüm değişkenler için oldukça yüksek ve istatistiksel olarak anlamlıdır (p < 0.01). Buna göre çalışma modelinde ülkeler arasında önemli derecede ilişki bulunmakta olup panel zaman serileri arasında yatay kesit bağımlılığı bulunmaktadır (Jensen & Schmidt, 2011).

3.2. Panel Birim Kok Test Sonuçları

Tablo 5: Çalışma Modeline ait Sonuçlar

Değişkenler	Katsayı (Coef.)	p-değeri (p-value)
lnDIJID	-0,102***	0,000
lnDIJIU	0,036***	0,069
lnGDP/k	1,025***	0,000
lnYENI	-0,321***	0,000
lnES	0,198**	0,023
Sabit (Constant)	-0,302**	0,041

Not: Katsayıların istatistiksel olarak anlamlılığı sırasıyla %1, %5 ve %10 düzeylerinde (*, **, ***) ifade edilmektedir (p < 0,01).

Tablo 5'e göre dijital dönüşüm ve yenilenebilir enerji kullanım oranının karbondioksit emisyonları üzerinde negatif bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Buna göre lnDIJID'te %1'lik bir artış lnCO₂'de %0,10 oranında azalma meydana getirirken, lnYENI'de oluşacak %1'lik bir artış ise lnCO₂'de %0,32 oranında bir azalma meydana getirmektedir. Diğer yandan dijital uçurum (lnDIJIU), kişi başına düşen gelir (lnGDP/k) ve eğitim seviyesi (lnES) değişkenleri lnCO₂ üzerinde pozitif bir etkiye sahip olarak hesaplanmıştır. lnDIJIU, lnGDP/k ve lnES için %1'lik artış CO₂ emisyonlarında sırasıyla %0,04, %1,02 ve %0,20'lik artış oluşturmaktadır. Bu bulgular literatürdeki benzer çalışmalardan olan Jacobsson & Johnson (2000) ve Mahalik vd. (2021) tarafından elde edilen bulgular ile uyumludur.

Tablo 6: Yenilenebilir Enerji-Dijital Dönüşüm-CO₂ Emisyonu İlişkisi Test Sonuçları

Değişkenler	Katsayı (Coef.)	p-değeri (p-value)
lnDIJID	-0,115***	0,007
lnDIJIU	0,046***	0,000
lnYENI	1,384***	0,000
lnDIJID × lnYENI	-0,258***	0,003
lnGDP/k	0,254***	0,000
lnES	-0,019***	0,321
Constant	-0,698***	0,012
ME _{DIJID}	-0,381	
T _{DIJID}	0,528	

Not: Katsayıların istatistiksel olarak anlamlılığı sırasıyla %1, %5 ve %10 düzeylerinde (*, **, ***) ifade edilmektedir (p < 0,01).

Tablo 6'ya göre lnDIJID × lnYENI, CO₂ emisyonları üzerinde %1 düzeyinde negatif ve anlamlı bir etkiye sahiptir. Sayısal olarak bakıldığında lnDIJID × lnYENI'nin lnCO₂ üzerindeki etkisi (-0.258), lnDIJID'e göre (-0.143) daha yüksek hesaplanmıştır. Yenilenebilir enerji-di-

jital dönüşüm-CO₂ emisyonu ilişkisi test sonuçları H1 hipotezini desteklemektedir. Elde edilen bulgular literatürdeki benzer çalışmalardan olan Vial (2021), Truong (2022) çalışmalarıyla uyumludur.

Tablo 7: Yenilenebilir Enerji-Dijital Uçurum-CO₂ Emisyonu İlişkisi Test Sonuçları

Değişkenler	Katsayı (Coef.)	p-değeri (p-value)
lnDIJID	-0,109***	0,000
lnDIJIU	0,147***	0,000
lnYENI	1,658***	0,000
lnDIJIU × lnYENI	-0,221***	0,000
lnGDP/k	0,159***	0,000
lnES	-0,057**	0,014
Constant	-0,469***	0,005
ME _{DIJIU}	0,069	
T _{DIJIU}	1,537	

Not: Katsayıların istatistiksel olarak anlamlılığı sırasıyla %1, %5 ve %10 düzeylerinde (*, **, ***) ifade edilmektedir.

Tablo 7 ile dijital uçurum ve yenilenebilir enerji kullanımının birlikte CO₂ emisyonu üzerindeki etkisi hesaplanmıştır. Buna göre her iki değişken birden CO₂ emisyonu üzerinde negatif bir etkiye sahiptir. Hesaplamaya göre lnDIJIU × lnYENI, %1 değerinde anlamlı olup bu skorlarda %1 değerindeki bir artış CO₂ emisyonu üzerinde %0,21 oranında bir azalış sağlamaktadır. Elde edilen sonuca göre, yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkisi dijital uçurumun artması ile negatif etkilenmektedir. Yenilenebilir enerji-dijital uçurum-CO₂ emisyonu ilişkisi test sonuçları ile H2 hipotezi doğrulanmaktadır. Elde edilen bulgular güncel çalışmalardan olan Sarwar vd. (2023), Yue vd., (2024) çalışmalarıyla uyumludur.

Tablo 8: Doğrusal Olmayan Eşbütünleşme Test Sonuçları

Değişkenler	Katsayı (Coef.)	p-değeri (p-value)
lnDIJID	-0,165**	0,002
lnDIJIU	0,101***	0,000
lnYENI	3,181***	0,000
(lnYENI) ²	-0,215**	0,013
lnGDP/k	0,204**	0,001
lnES	-0,055	0,301
Constant	-0,169**	0,053
ME _{YENI}	1,714	

Not: Katsayıların istatistiksel olarak anlamlılığı sırasıyla %1, %5 ve %10 düzeylerinde (*, **, ***) ifade edilmektedir.

Tablo 8, yenilenebilir enerjinin CO₂ emisyonları üzerindeki doğrusal olmayan etkisini göstermektedir. Buna göre yenilenebilir enerji kullanım oranı ile CO₂ emisyonları arasında

%5 anlamlılık seviyesinde ve negatif yönde bir ilişki bulunmaktadır. Bu durumda lnYENİ'deki %1'lik bir artış lnCO₂'yi yaklaşık %22 oranına azaltmaktadır. Elde edilen skora göre Tablo 8, analiz ülkeleri için oluşturulan H3 hipotezini (yenilenebilir enerjinin CO₂ emisyonları üzerinde ters U şeklinde bir etkisi vardır) doğrulamaktadır. Bu bulgular Li & Ni (2021), Misra & Srivastava (2024) çalışmalarıyla uyumludur.

Analizin birinci kısmında elde edilen bulgulara göre yenilenebilir enerjinin koşullu etkisi dikkate alınarak dijital dönüşüm-dijital uçurum ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiye dayanan önceki çalışmalara ek sonuçlar geliştirilmiştir (Nong vd., 2021; Gong & Ribiere, 2021; Truong, 2022; Khan vd., 2022; Nazari & Musilek, 2023).

3.3. Veri Zarflama Analizi (VZA) ve Malmquist Toplam Faktör Verimlilik Analizi

Karar Verme Birimleri (KVB) arasında karşılaştırmalı etkinlik analizi yapmak için kullanılan VZA, 1956'da Farrell'in sınır (frontier) analizine dayanan ve 1978 yılında Charnes, Cooper, Rhodes ve 1982 yılında Banker, Charnes, Cooper tarafından geliştirilerek isimlerinin baş harfi ile anılan (CCR ve BCC) modeller olarak ortaya atılmıştır. CCR modeli ölçüğe göre sabit getiri varsayımı (Constant Return to Scale-CRS) altında ele alınırken BCC modeli ise ölçüğün değişken getiri varsayımı (Variable Return to Scale-VRS) altında hesaplanmaktadır (Wöber, 2007; Cooper vd., 2011; Ji & Lee, 2010).

CCR ve BCC modelleri şu şekilde ifade edilmektedir (Charnes vd., 1997: 332; Wei vd., 2000):

j. karar noktası için,

$$\frac{u_1 y_1 + u_2 y_2 + \dots + u_n y_n}{v_1 x_1 + v_2 x_2 + \dots + v_m x_m} \quad (6)$$

(6) numaralı denklemde bulunan,

j. karar noktası için n adet çıktı ve m adet girdi bulunmaktadır.

u_n = n. Çıktının ağırlığı

y_n = n. Çıktının miktarı

v_m =m. Girdinin ağırlığı

x_m =m. Girdinin miktarını göstermektedir.

(6) numaralı doğrusal programlama formülünden hareketle VZA;

$$\frac{\text{Çıktıların Ağırlıklı Toplamı}}{\text{Girdilerin Ağırlıklı Toplamı}} = \frac{\sum_{i=1}^s u_i y_{iq}}{\sum_{j=1}^m v_j x_{jq}} \quad (7)$$

(7) numaralı denkleme göre;

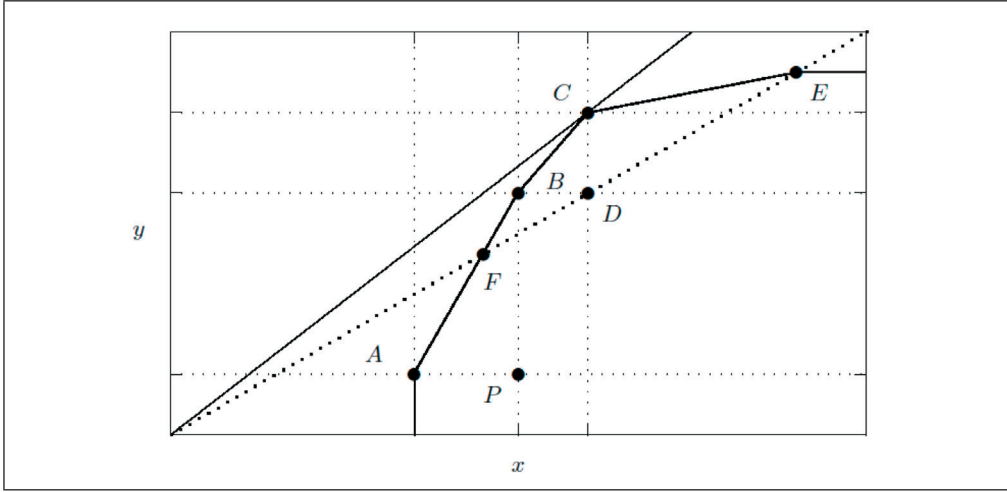
u_i ; i. çıktının ağırlığını,

y_{iq} "q" birimden elde edilen ilk çıktıyı,

v_j : j. girdinin ağırlığını,

x_{jq} : "q" birimi tarafından tüketilen ilk girdiyi göstermektedir.

Şekil 1: VRS-CRS Etkinlik Sınırı ve Ölçek Etkinlik



Kaynak: Tarım (2001), Lim & Zhu (2015)

Şekil 1'de Girdiler X ile Çıktılar ise Y ile gösterilmektedir. CRS (Constant Returns to Scale - Ölçeğe Göre Sabit Getiri), üretim üst sınırı düz bir doğru ile temsil edilmektedir. CRS'de birim girdi başına birim çıktı artışı elde edilmektedir. VRS (Variable Returns to Scale - Ölçeğe Göre Değişken Getiri), kesikli ve esnek bir yapıya sahiptir. Bu haliyle CRS'nin sağ alt kısmında yer alır ve CRS varsayımı altında teknik etkinlik sınırını oluşturmaktadır. Şekil 1, KVB'lerin üretim imkânları eğrisini üretim üst sınırı şeklinde ifade etmektedir. A, B, C, D, E, F ve P noktaları KVB'ler olarak belirlenmiştir. Zarf modelindeki çizgi üzerinde bulunan A, B, C, E ve F KVB'leri etkin üretim gerçekleştirirken D ve P birimi görece etkinsiz kabul edilmektedir (Asmild, 2009; Ghiyasi, 2015). Şekil 1'de zarf şeklindeki çizgi ölçeğe göre değişken getiri varsayımını gösterirken, düz çizgi ölçeğe göre sabit getiri varsayımını göstermektedir. Şekle göre C hem CRS hem de VRS'de etkin iken A, F, B ve E KVB'leri, VRS'de etkin olup CRS'de üretim üst sınırının altında kalarak etkinsiz olmuştur (Ghiyasi, 2015; Çakmak & Örküçü, 2016; Dellnitz vd., 2018). Bu nedenle VRS modeliyle elde edilen etkin KVB sayısı CRS modeliyle elde edilen etkin KVB sayısından daha fazla hesaplanmaktadır (Bhat vd., 2001; Cook & Seiford, 2009; Lim & Zhu, 2015).

$$E_0 = \max \sum_{r=1}^s u_r Y_{r0} - u_0 / \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} \quad (8)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{r=1}^s u_r Y_{rj} - u_0 / \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad i = 1, 2, \dots, m$$
$$v_i u_r \geq \varepsilon \quad r = 1, 2, \dots, s$$

(8) numaralı denkleme $u_0=0$ 'ıncı KVB'nin serbest işaretli değişkeni eklenerek, modifiye edilen CRS modeli etkinlik sınırı değiştirilerek VRS primer model elde edilmektedir.

$$\max \sum_{r=1}^s u_r Y_{r0} \quad (9)$$

Kısıtlar;

$$\max \sum_{i=1}^m v_i X_{i0} = 1 ,$$

$$\sum_{r=1}^s u_r Y_{rj} - u_0 \leq \sum_{i=1}^m v_i X_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$v_i u_r \geq \varepsilon \quad r = 1, 2, \dots, s \quad i = 1, 2, \dots, m$$

VRS dual modelinde ağırlık (λ) toplamları 1'e eşittir. Buna göre VRS'nin Dual modeli;

$$\text{Min } \theta - \varepsilon (\sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+) \quad (10)$$

Kısıtlar,

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - \theta x_{i0} + s_i^- = 0 , \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - y_{r0} - s_r^+ = 0 , \quad r = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j, s_i^-, s_r^+ \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, s, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

VZA'nın temel amaçlarından birisi herhangi bir KVB'nin etkinliğini "0" (en düşük) ve "1" (en yüksek) skorları arasında belirlemektir. Buna göre bir KVB'nin etkinlik skoru "1" ise söz konusu KVB etkin üretim gerçekleştirmiş olarak kabul edilir. Aksi durumda ise etkin olmayan üretim yapan KVB olarak adlandırılmaktadır (Ramanathan, 2003; Charnes vd., 2011; Sánchez, 2018).

VZA ile birlikte çoklu değişkenlerin yer aldığı verimlilik analizlerinde iki zaman dilimi arasındaki uzaklık fonksiyonunu belirleyerek verimlilik analizi yapan Malmquist Toplam Faktör Verimlilik İndeksi (MTFVI) literatürde sıkça rastlanan metotlar arasındadır (Wang v& Lan, 2011). Bu yönüyle MTFVI, bir KVB'nin iki dönem arasındaki verimlilik değişimini değerlendirir ve KVB'leri birbiriyle kıyaslar.

Bu çalışmada yer alan 20 ileri yükselen piyasa ekonomisi ve BDT geçiş ekonomilerinin 23 yıllık verileri kapsamında MTFVI uygulanmıştır. MTFVI verimlilik değişimlerinin nede-nini Teknik Etkinlik Değişimi (TED), Teknolojik Etkinlik Değişimi (TD), Saf Etkinlik Değişimi (SED), Ölçek Etkinlik Değişimi (ÖED) ve Toplam Faktör Verimlilik Değişimi (TFVD) olarak belirlemektedir. TED "üretim sınırını yakalama etkisi" (catch-up) olup bir KVB'nin iki dönem arasındaki verimlilik değişimini değerlendirir. TD "üretim sınırının yer değiştirmesi" veya "yenilik" (frontier-shift) indeksi ise iki zaman dönemi arasında etkin sınırlardaki değişim miktarını belirlemek için kullanılır (Sánchez, 2018). SED ve ÖED çarpımı TED sonucunu vermektedir. TED ile TD çarpımından ise TFVD elde edilmektedir ve aşağıdaki gibi formüle edilmiştir (Camanho & Dyson, 2006; Cooper vd., 2007):

$$CatchUp (TED) = \frac{(X_0 Y_0)^2}{(X_0 Y_0)^1} \quad (11)$$

$(X_0 Y_0)^2$: İkinci dönem etkinlik sınırının etkinlik değeri,

$(X_0 Y_0)^1$: Birinci dönem etkinlik sınırının etkinlik değeridir.

$$Frontier - shift (TD) = \sqrt{(\phi 1 * \phi 2)} \quad (12)$$

$$Malmquist Index (TFVD) = CatchUp (TED) X FrontierShift (TD) \quad (13)$$

İlk olarak CRS ve VRS modellerinin çözümlenmesi ile yıllara göre elde edilen KVB'lerin ortalama etkinlik skorları Tablo 9 ile gösterilmiştir.

Tablo 9: Yıllara göre VZA Skorları

Yıllar	(CRS)	(VRS)	(SE)	
2000	1,000	1,000	1,000	Sabit
2001	1,000	1,000	1,000	Sabit
2002	0,955	1,000	1,000	Sabit
2003	1,000	1,000	1,000	Sabit
2004	0,879	0,948	0,960	Azalan
2005	0,628	0,959	0,995	Azalan
2006	1,000	1,000	1,000	Sabit
2007	0,887	0,938	0,999	Azalan
2008	1,000	1,000	1,000	Sabit
2009	0,975	1,000	1,000	Sabit
2010	0,912	0,957	0,963	Azalan
2011	1,000	1,000	1,000	Sabit
2012	1,000	1,000	1,000	Sabit
2013	1,000	1,000	1,000	Sabit
2014	0,890	0,890	0,901	Azalan
2015	1,000	1,000	1,000	Sabit
2016	0,656	0,828	0,930	Azalan
2017	1,000	1,000	1,000	Sabit
2018	0,985	0,801	0,945	Azalan
2019	0,922	0,831	0,900	Azalan
2020	1,000	1,000	1,000	Sabit
2021	0,939	1,000	1,000	Sabit
2022	0,960	0,969	0,986	Azalan
2023	0,935	1,000	1,000	Sabit

CRS: Constant Return to Schale (Sabit Getiri Varsayımı), VRS: Variable Return to Schale (Değişken Getiri Varsayımı), SE: Schale Eficiency (Ölçek Etkinliği) olarak ifade edilmektedir.

Tablo 9'a göre, analiz döneminin başlarında tüm KVB'lerin CRS, VRS ve SE'de ortalama etkinlik skorları 1,000 olarak hesaplanmış olup sabit ölçekte üretim faaliyeti yürütüldüğü görülmektedir. Daha sonraki yıllarda ise hem CRS hem de VRS skorlarına göre etkin üretimden sapmalar olduğu dikkat çekmektedir. CRS'de 2002 ile başlayan etkinlik kayıpları, VRS'de 2004 yılına karşılık gelmektedir. Aynı şekilde ölçek etkinliğinde de azalan üretimin başladığı dönem yine 2004 olarak görülmektedir. CRS'de en fazla etkinlik kaybının görüldüğü yıllar sırasıyla 2005'te %37,2 ve 2016'da %34,4 iken VRS'de bu oran 2005'de %27,1 ve 2014'te %20 olarak hesaplanmıştır. 2020 yılında "1,000" ortalama skoruyla her iki modele göre etkin olan KVB'ler CRS'de 2023'e kadar ortalama etkinsiz, VRS'de ise 2022 yılı hariç etkin olarak hesaplanmıştır.

Tablo 10: KVB'lerin Toplam Faktör Verimlilik Değişimleri (2000-2023)

Ülkeler	TED*	TD*	SED*	ÖED*	TFVD*
Brezilya	0,978	1,019	0,978	1,000	0,996
Çekya	0,996	1,018	1,000	0,996	1,014
Macaristan	0,986	0,950	0,975	1,011	0,936
Malezya	0,969	1,009	1,000	0,969	0,977
Meksika	0,974	0,999	0,998	1,000	0,981
Polonya	0,964	0,950	0,965	0,999	0,916
Güney Afrika	0,993	1,013	0,994	0,999	1,006
Tayvan	1,000	1,025	1,000	1,000	1,025
Tayland	1,005	0,948	1,005	1,000	0,953
Türkiye	0,980	1,020	1,000	0,915	1,000
Azerbaycan	0,997	0,938	1,000	0,997	0,935
Ermenistan	0,994	0,952	0,996	0,998	0,946
Belarus	1,016	0,936	1,002	1,013	0,951
Kazakistan	1,032	0,950	1,012	1,019	0,980
Moldova	1,008	0,977	1,000	1,008	0,985
Kırgızistan	1,027	0,949	1,024	1,003	0,975
Rusya	1,048	0,952	1,000	1,048	0,997
Tacikistan	1,008	1,002	1,031	0,978	1,011
Türkmenistan	0,974	0,969	1,020	1,018	0,943
Özbekistan	1,019	0,968	1,008	1,010	0,986

*TED (Efficiency Change - Etkinlik Değişimi): Teknik etkinlikteki değişimi ölçer. TED > 1, iyileşmeyi; TED < 1 ise teknik etkinlikte düşüşü ifade eder. *TD (Technical Change - Teknolojik Değişim): Teknolojik gelişmeleri ifade eder. TD > 1, üretim sınırındaki teknolojik ilerlemeyi gösterir. *SED (Pure Efficiency Change - Saf Etkinlik Değişimi): Organizasyonel verimlilikteki değişimi gösterir. SED > 1, yönetsel düzeyde iyileşmeyi belirtir. *ÖED (Scale Efficiency Change - Ölçek Etkinlik Değişimi): Ölçekten kaynaklanan verimlilik değişimini ifade eder. ÖED > 1, ölçek avantajlarının kullanıldığını belirtir. *TFVD (Total Factor Productivity Change - Toplam Faktör Verimliliği Değişimi): Genel üretkenlik değişimini ölçer. TFVD > 1, toplam verimlilikte bir artış olduğunu, TFVD < 1 ise toplam verimlilikte düşüş olduğunu gösterir.

Tablo 10 incelendiğinde TFVD > 1 skoru elde ederek dönemin tamamında verimli olan ülkelerden üçü ileri yükselen piyasa ekonomilerinden Tayvan, Çekya ve Güney Afrika iken BDT ülkelerinden yalnızca Tacikistan olmuştur. Bu ülkelerden Tayvan’da TED, SED ve ÖED değerleri ortalama “1.000” skoru elde ederek sabit etkinlik yakalamış olup özellikle ülkenin teknolojik ilerlemesini gösteren TED değerindeki %2,5 değerindeki artış verimlilik artışındaki en önemli etken olarak değerlendirilmektedir. Buna göre Tayvan’da yenilenebilir enerji kullanım oranı, eğitim seviyesi, dijital dönüşüm yatırımları ve kişi başına düşen gelirden meydana gelen bir artış CO₂ emisyonlarının azaltılmasında diğer KVB’lere kıyasla daha büyük bir azalış meydana getirmektedir. Diğer bir deyişle bu ülkede bir birimlik girdi başına bir birimden daha fazla çıktı elde edilmiştir. Çekya ise teknolojik ilerlemelerden ve yönetim etkinliğindeki artıştan kaynaklı olarak TFVD değerinde artış yakalamıştır. Çekya’da etkin üretim çizgisi dönemin tamamında ortalama olarak yukarı doğru kayarak aynı girdi miktarı için elde edilen çıktı miktarını yükseltmiştir. Diğer yandan TED ve ÖED için hesaplanan azalma toplam verimliliğin baskılanmasına neden olmaktadır. Bu sonuç Çekya’da dijital dönüşüm yatırımlarının özellikle dijital uçurum çıktı göstergesinin azaltılmasında etkin rol oynadığını göstermektedir. Diğer yandan skorlar Çekya’nın kaynak israfının azaltılmasına yönelik politikaları (örneğin eğitim seviyesi) ve karar mekanizmalarına yönelik stratejileri revize etmesini işaret etmektedir. Aynı şekilde Güney Afrika’da özellikle TD değerindeki %1,3 değerindeki artışın TFVD artışında kilit rol oynadığı anlaşılmaktadır. Bu durumda Çekya için yapılan yorumlar Güney Afrika için de geçerli olacaktır. Diğer yandan Güney Afrika’nın CO₂ emisyonlarını istenilen seviyelere indirmesi için eğitim seviyesi ve kişi başına düşen gelir miktarında VZA ile hesaplanan potansiyel iyileştirmeleri gerçekleştirmesi gerekmektedir. Tacikistan’a bakılacak olursa, ülkede artan TED, TD ile birlikte özellikle SED için hesaplanan ortalama %3,1 değerindeki artış önemli bir itici güç olmuş ve TFVD değerinin ortalama %1,1 oranında artmasını sağlamıştır. Tacikistan’da hem dijital dönüşüm hem de yenilenebilir enerji kullanımındaki göstergeler ülkenin CO₂ emisyonları ve dijital uçurum oranlarının azaltılmasında önemli rol oynadığını göstermektedir.

TFVD değeri ortalama “1.000” olarak hesaplanan Türkiye’de en önemli avantajın ortalama %2’lik teknolojik ilerlemeyle yakalandığı görülmektedir. Fakat diğer taraftan ÖED değerindeki ortalama %2,2 değerindeki azalış TFVD değerindeki artışı sınırlandırmıştır. Bu durum Türkiye’de özellikle dijital dönüşüm yatırım politikalarının dijital uçurumun azaltılmasında kilit role sahip olduğunu ortaya koymuştur. Öte yandan Türkiye’de yenilenebilir enerji politikalarının CO₂ emisyonlarını azaltmada %2 düzeyinde bir etkinlik kaybı tespit edilmiştir. Her ne kadar eğitim seviyesinde önemli iyileştirmeler yapılmış olsa da Türkiye’de, yenilenebilir enerji kullanım oranı ve kişi başına düşen gelir değişkenlerinde belirlenen potansiyel iyileştirmelerin yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Tablo 10’a göre, MTFV analizi ile CO₂ emisyonları ve dijital uçurumun azaltılmasında İYE ülkelerinin, BDT geçiş ekonomilerinden daha etkin olduğu anlaşılmıştır. Bu çerçevede bakılacak olursa Tablo 10’dan Skoru “1.000” değerinin altında hesaplanan Brezilya, Meksika ve Malezya’nın, etkinlik skoruna oldukça yakın yerde olduğu görülmektedir. Bu ülkelere ^{m5üstakil} olarak bakılacak olursa; Brezilya’da TD değerindeki ortalama %2’lik artışa rağmen SED’deki ortalama %2,2’lik orandaki azalış, Meksika’da durağan ÖED değerine karşın TED değerinde ortalama %2,6 oranındaki azalış ve Malezya’da özellikle ÖED değerindeki ortalama %3,1’lik ciddi azalış ile bu ülkelerde TFVD değerinin istenilen seviyeye ulaşılmasında engel olduğu an-

laşılmaktadır. Tablo 10'a göre TFVD<1 olan KVB'lerden Polonya, Azerbaycan ve Macaristan en yüksek verimlilik kaybı yaşayan ülkeler olarak tespit edilmiştir. TFVD değerinin azalması Polonya'nın TED ve TD'de sırasıyla ortalama %3,6 ve %5 oranındaki önemli azalışları dikkati çekerken Azerbaycan'da tek başına TED'nin %6,2'lik azalışı önemli bir neden olmuştur. Diğer yandan Macaristan'da %1,1 oranında ÖED değeri artmış olmasına rağmen özellikle TD'nin %5 azalması TFVD değerinde %6,4 oranında azalış meydana getirmiştir. Ayrıca Tablo 10, Çekya, Tayvan, Güney Afrika ve Tacikistan'ın tüm KVB'ler içerisinde TFVD skorunda artış elde ederek diğer KVB'lere referans olduğunu göstermektedir. Özellikle TD değişiminde %25 değerindeki ciddi artışı elde eden Tayvan benzer ölçekte faaliyette bulunan Tayland'ın %5 dolaylarındaki TED artışında elde edemediği verimlilik artışında referans oluşturmakta ve potansiyel iyileştirme (Pİ) adımlarında önemli rol oynamaktadır. İYE ekonomilerinden etkisiz olup etkin üretim sınırından en uzakta yer alan Polonya'ya bakıldığında bu ülke için İYE ülkelerinden özellikle Türkiye ve Tayvan'ın referans KVB olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda Polonya için teknolojik imkanlardan daha fazla yararlanmak yoluyla etkin üretim çizgisini yukarı yönde çıkaracak stratejileri öncelendirmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. BDT ülkelerinde ise etkisiz olup etkin üretim sınırından en uzakta yer alan Türkmenistan için BDT ülkelerinden Tacikistan referans ülke olmuştur. Buna göre Türkmenistan'ın kaynak israfını önleyecek politikalar üreterek etkin üretim çizgisini yakalama hızını artırması gerekmektedir.

4. Sonuç

Son elli yılda, ekonomik sürdürülebilirlik ile ekolojik sürdürülebilirlik kavramları küresel düzeyde bütüncül bir yaklaşımla ele alınmaya başlanmıştır. Bu bilinç bilişim teknolojilerinin ürünü olan dijitalleşmenin insan hayatına hızla girmesiyle artan, iktisadi, ticari ve sınai faaliyetlerin enerji kullanımında sürdürülebilirliğin önemini daha da ortaya koymuştur. İklim değişikliğinin doğal denge üzerindeki yıkıcı etkisi yayılmacı çevresel felaketlerin de tetikleyicisi olmuştur. Bütün bu nedenlerden dolayı doğal dengenin korunması amacıyla ülkeler arasında ortak stratejiler geliştirilerek acil eylem planları uygulamaya geçirilmektedir. Bu bağlamda bu çalışma 2000-2023 döneminde İYE ve BDT geçiş ekonomileri içerisindeki 20 ülkenin farklı değişkenler (dijital dönüşüm, kişi başına düşen gelir ve eğitim seviyesi) aracılığıyla elde edilen yenilenebilir enerji kullanımının istenmeyen (CO₂ emisyonları ve dijital uçurum) çıktılarını azaltmada ne derecede etkili olduğunu araştırmayı amaçlamaktadır. Analizler kapsamında ayrıca bu ülkelerin CO₂ emisyonlarını ve dijital uçurum göstergelerini azaltmadaki etkinlikleri ve toplam faktör verimlilikleri de karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışma analizinin birinci kısmında uygulanabilir GEKK tahmincisi kullanılarak analize katılan İYE ve BDT geçiş ekonomilerinde dijital dönüşüm yatırımları ve yenilenebilir enerjinin CO₂ emisyonlarını azalttığı tespit edilmiştir. Diğer yandan eğitim seviyesi ve kişi başına düşen gelirin CO₂ emisyonları üzerinde pozitif yönlü fakat zayıf etkisi olduğu görülmüş olup yenilenebilir enerji göstergesi ile eğitim seviyesi arasında da yine pozitif yönlü bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda eğitim seviyesi ve gelir artışı sonucunda CO₂ emisyonlarında artış yaşanırken, yenilenebilir enerji kullanım oranında da artış yaşandığı sonucuna ulaşılmıştır. Buna göre eğitim seviyesi ve kişi başı gelir artışı ilk başlarda CO₂ emisyonlarını artıracak ancak ilerleyen zamanlarda beşerî sermaye ile sürdürülebilir çevre bilincinin elde edilmesiyle bu artış oranının azalacağı tahmin edilmektedir. Elde edilen diğer bir sonuç ise dijital uçurumun, yenilenebilir enerji tüketiminin

CO₂ emisyonlarını azaltmak için itici güç olduğunu, yenilenebilir enerjinin ise dijital uçurum göstergesinin CO₂ emisyonları üzerindeki artırıcı etkisini azalttığını göstermiştir. Diğer yandan yenilenebilir enerjinin CO₂ emisyonları üzerinde ters U şeklinde bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Etkinlik ve verimlilik analizi neticesinde analizde yer alan 20 KVB sabit getiri varsayımında (CRS) 2000, 2001, 2003, 2006, 2008, 2011, 2012, 2013, 2015, 2017, 2020 ve 2023 yıllarında tam etkin iken 2016 ve 2018 yıllarında ortalama en düşük etkin üretim ve azalan ölçek faaliyeti göstermiştir. Ölçeğin değişken getiri (VRS) skorunda ise 2000-2003, 2006, 2008, 2009, 2011-2013, 2015, 2017, 2020, 2021 ve 2023 yıllarında KVB'ler ortalama olarak etkin üretim gerçekleştirdiği ve böylece âtil kullanılan girdi miktarını minimize ettiği diğer bir deyişle kaynak israfını en aza indirdiği görülmüştür. Buna rağmen 2004, 2005, 2007, 2010, 2014, 2016, 2018, 2019 ve 2022 yıllarında ise VRS skorlarında önemli düşüşlerin yaşanması ülkelerde kaynak israfının arttığı ya da âtil kullanılan girdi oranının yükseldiği sonucunu göstermektedir. MI analizi sonuçlarında TED>1 olan ülkelerde (Tayland, Belarus, Kazakistan, Moldova, Kırgızistan, Rusya, Tacikistan ve Özbekistan) etkin üretim çizgisine ulaşma hızında artış gözlenirken, TED<1 olan ülkeler için etkin üretim sınırını yakalama hızında azalma olduğu gözlenmiştir. Teknolojik yeniliklerin üretim süreçlerine entegre edilmesinde diğer bir deyişle etkin üretim çizgisini yukarı doğru kaydırarak bir birimlik girdi başına bir birimden fazla çıktı elde edebilen ülkeler Brezilya, Çekya, Malezya, Güney Afrika, Tayvan, Türkiye ve Tacikistan olarak hesaplanmıştır. Bu ülkelerde teknolojik ilerlemelerin diğer ülkelere kıyasla görece yüksek olduğu saptanmıştır. Tüm KVB'ler içerisinde TFVD>1 olan ülkeler Çekya, Güney Afrika, Tayvan ve Tacikistan dönemin tamamında ortalama göreceli verimli olarak belirlenmiştir. Verimlilik analizi sonucunda KVB'lerden İYE grubu ülkeler, BDT geçiş ekonomilerine kıyasla CO₂ emisyonlarını azaltmada daha yüksek verimliliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Buna göre İYE ülkelerinde dijital uçurum göstergelerini azaltıcı önlemlere öncelik verilirken BDT geçiş ekonomilerinde özellikle CO₂ emisyonlarını azaltıcı önlemlere öncelik verilmelidir. Tüm KVB'ler için dijital dönüşüm teknolojilerinin özellikle yenilenebilir enerji kullanımını önceleyecek yeniliklere yönlendirici olması sağlanmalıdır. Bu stratejilerle hükümetler metropollerde enerji kullanımını azaltıcı alternatif önlemler olarak ekolojik tehditleri minimize etmelidir. Bu kapsamda ülkeler arasında yenilenebilir enerjinin kullanımına yönelik daha kapsamlı işbirliği ağlarının oluşturulması gerekmektedir. Her ülke potansiyel dinamikleri aracılığıyla ürettikleri sürdürülebilir çevre projelerini farklı ülkelere entegre edecek fikirler geliştirmelidir. Böylece dijitalleşme, enerji ve ekonomi alanında çevre ve enerji riskini ortadan kaldıracak politikalar oluşturulmalıdır. Bunun için bölgesel farklılıklar dikkate alınmalı özellikle gelişmekte olan ülkeler için dijital altyapıya yönelik teşvik mekanizmaları öne alınırken, gelişmiş ekonomilerde daha çok dijital inovasyona yönelik destekler öne alınmalıdır. Diğer yandan ülke çapında ulusal sıfır atık ve karbonsuzlaştırma politikaları ile dijital dönüşüm süreci entegre edilmeli ve bu sürece kamu-özel sektör iş birliği özellikle dahil edilmelidir.

Araştırmacıların Katkı Oranı

Yazar, verilerin temini, metodolojinin belirlenmesi, literatür taraması, verilerin analizi, makalenin yazımı ve sonuçların değerlendirilmesi konularında çalışmayı tek yazarlı olarak yürütmüştür.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Kaynakça

- Abbas, Q., Yao, H. X., Shahbaz, M., Ramzan, M., & Fatima, S. (2023). How renewable energy and digitalization affect CO₂ emissions? The mediating role of public debt in emerging economies. *The Mediating Role of Public Debt in Emerging Economies*.
- Adebayo, T. S., Ullah, S., Kartal, M. T., Ali, K., Pata, U. K., & Ağa, M. (2023). Endorsing sustainable development in BRICS: The role of technological innovation, renewable energy consumption, and natural resources in limiting carbon emission. *Science of the Total Environment*, 859, 160181.
- Asmild, M., Paradi, J. C., & Pastor, J. T. (2009). Centralized resource allocation BCC models. *Omega*, 37(1), 40-49.
- Beier, G., Fritzsche, K., Kunkel, S., Matthes, M., Niehoff, S., Reißig, M., & van Zyl-Bulitta, V. (2020). Grüne digitalisierte Wirtschaft. *Herausforderungen und Chancen für die Nachhaltigkeit (IASS Fact Sheet)*. IASS.
- Ben Jebli, M., Ben Youssef, S., & Apergis, N. (2019). The dynamic linkage between renewable energy, tourism, CO₂ emissions, economic growth, foreign direct investment, and trade. *Latin American Economic Review*, 28(1), 1-19.
- Bhat, R., Verma, B. B., & Reuben, E. (2001). Data envelopment analysis (DEA). *Journal of Health Management*, 3(2), 309-328.
- Bianchini, S., Damioli, G., & Ghisetti, C. (2023). The environmental effects of the “twin” green and digital transition in European regions. *Environmental and Resource Economics*, 84(4), 877-918.
- Breusch, T. S., & Pagan, A. R. (1980). The Lagrange multiplier test and its applications to model specification in econometrics. *The Review of Economic Studies*, 47(1), 239-253.
- Camanho, A. S., & Dyson, R. G. (2006). Data envelopment analysis and Malmquist indices for measuring group performance. *Journal of Productivity Analysis*, 26, 35-49.
- Campoli, J. S., Junior, P. N. A., Kodama, T. K., Nagano, M. S., & Burnquist, H. L. (2024). G20 countries' progress on the 7th SDG under circular economy DEA model. *Environmental Science & Policy*, 160, 103839.
- Chang, Y. (2004). Bootstrap unit root tests in panels with cross-sectional dependency. *Journal of Econometrics*, 120(2), 263-293.
- Charnes, A., Cooper, W., Lewin, A. Y., & Seiford, L. M. (1997). Data envelopment analysis theory, methodology and applications. *Journal of the Operational Research Society*, 48(3), 332-333.
- Choi, I. (2001). Unit root tests for panel data. *Journal of International Money and Finance*, 20(2), 249-272.
- Chudik, A., & Pesaran, M. H. (2013). Large panel data models with cross-sectional dependence: A survey. *CAFE Research Paper*, (13.15).
- Cocchia, A. (2014). Smart and digital city: A systematic literature review. İçinde R. Dameri, & C. Rosenthal-Sabroux, (Ed.), *Smart city: How to create public and economic value with high technology in urban space*, 13-43.
- Cole, M. A., Rayner, A. J., & Bates, J. M. (1997). The environmental Kuznets curve: An empirical analysis. *Environment and development economics*, 2(4), 401-416.
- Cook, W. D., & Seiford, L. M. (2009). Data envelopment analysis (DEA)—Thirty years on. *European Journal of Operational Research*, 192(1), 1-17.
- Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Tone, K. (2007). *Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software (Vol. 2, p. 489)*. New York: Springer.

- Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Zhu, J. (2011). Data envelopment analysis: History, models, and interpretations. *Handbook on data envelopment analysis*, 1-39.
- Cui, L., Chen, L., & Yang, X. (2023). Evaluation and analysis of green efficiency of China's coastal ports under the "double carbon" goal: Two improved DEA models with CO₂ emissions. *Environment, Development and Sustainability*, 1-30.
- Çakmak, E., & Örkçü, H. H. (2016). Türkiye'deki illerin etkinliklerinin sosyo-ekonomik temel göstergelerle veri zarflama analizi kullanılarak incelenmesi. *Karabük Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 6(1), 30-48.
- Daneeva, Y., Glebova, A., Daneev, O., & Zvonova, E. (2020, August). Digital transformation of oil and gas companies: Energy transition. İçinde *Russian Conference on Digital Economy and Knowledge Management (RuDEcK 2020)* (S. 199-205). Atlantis Press.
- De Hoyos, R. E., & Sarafidis, V. (2006). Testing for cross-sectional dependence in panel-data models. *The Stata Journal*, 6(4), 482-496.
- Dellnitz, A., Kleine, A., & Rödder, W. (2018). CCR or BCC: what if we are in the wrong model?. *Journal of business economics*, 88, 831-850.
- Dietz, T., & Rosa, E. A. (1997). Effects of population and affluence on CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(1), 175-179.
- Dincer, I. (2000). Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 157-175.
- Dodman, D. (2009). Urban form, greenhouse gas emissions and climate vulnerability. İçinde *Population dynamics and climate change* (Vol. 2009, S. 64-79). London, UK: UNFPA-IIED.
- Dong, F., Li, Y., Gao, Y., Zhu, J., Qin, C., & Zhang, X. (2022). Energy transition and carbon neutrality: Exploring the non-linear impact of renewable energy development on carbon emission efficiency in developed countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 106002.
- Doornik, J. A., Shephard, N., & Hendry, D. F. (2005). Parallel computation in econometrics: A simplified approach. İçinde *Handbook of Parallel Computing and Statistics* (S. 465-492). Chapman and Hall/CRC.
- Ehrlich, P. R., & Holdren, J. P. (1971). Impact of population growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive. *Science*, 171(3977), 1212-1217.
- Frisch, R. (1934). Circulation planning: Proposal for a national organization of a commodity and service exchange. *Econometrica, Journal of the Econometric Society*, 258-336.
- Gao, D., Li, G., & Yu, J. (2022). Does digitization improve green total factor energy efficiency? Evidence from Chinese 213 cities. *Energy*, 247, 123395.
- Gao, J., Xu, N., & Zhou, J. (2023). Does digital transformation contribute to corporate carbon emissions reduction? Empirical evidence from China. *Sustainability*, 15(18), 13414.
- Ghiyasi, M. (2015). On inverse DEA model: The case of variable returns to scale. *Computers & Industrial Engineering*, 87, 407-409.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24, 38-50.
- Gong, C., & Ribiere, V. (2021). Developing a unified definition of digital transformation. *Technovation*, 102, 102217.
- Granger, C. W., & Newbold, P. (1974). Spurious regressions in econometrics. *Journal of econometrics*, 2(2), 111-120.

- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2012). *Temel ekonometri* (Ü. Şenesen & GG Şenesen, Çev.). İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- Gwelo, A. S. (2019). Principal components to overcome multicollinearity problem. *Oradea Journal of Business and Economics*, 4(1), 79-91.
- Harris, R. D., & Tzavalis, E. (1999). Inference for unit roots in dynamic panels where the time dimension is fixed. *Journal of econometrics*, 91(2), 201-226.
- Harris, R., & Sollis, R. (2003). *Applied Time Series Modelling and Forecasting*. England: John Wiley&SonsLtd.
- Helsper, E. (2021). *The digital disconnect: The social causes and consequences of digital inequalities*. SAGE.
- Hinings, B., Gegenhuber, T., & Greenwood, R. (2018). Digital innovation and transformation: An institutional perspective. *Information and Organization*, 28(1), 52-61.
- Hofer, C. W. (1975). Toward a contingency theory of business strategy. *Academy of Management Journal*, 18(4), 784-810.
- Hossin, M. A., Alemzero, D., Wang, R., Kamruzzaman, M. M., & Mhlanga, M. N. (2023). Examining artificial intelligence and energy efficiency in the MENA region: The dual approach of DEA and SFA. *Energy Reports*, 9, 4984-4994.
- Hou, J., & Fu, Y. (2024). Study on the spillover effect of digital economy development on CO2 emissions. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1358093.
- Huang, C., Wang, C., Rani, T., & Rehman, S. A. U. (2024). Digitalization's role in shaping climate change, renewable energy, and technological innovation for achieving sustainable development in top Asian countries. *Energy & Environment*, 0958305X241258799.
- Huang, S., Yang, L., Yang, C., Wang, D., & Li, Y. (2024). Obscuring effect of income inequality and moderating role of financial literacy in the relationship between digital finance and China's household carbon emissions. *Journal of Environmental Management*, 351, 119927.
- IEEFA (2024). *Enerji Ekonomisi ve Finansal Analiz Enstitüsü Raporu 2023*. https://ieefa.org/reports?keys=&tid_1%5B6%5D=6&topic%5B584%5D=584&topic%5B590%5D=590 sayfasından erişilmiştir. Erişim Tarihi: 25.10.2024.
- Ionaşcu, I., Ionaşcu, M., Nechita, E., Săcărin, M., & Minu, M. (2022). Digital transformation, financial performance and sustainability: Evidence for European Union listed companies. *Amfiteatru Economic*, 24(59), 94-109.
- Jacobsson, S., & Johnson, A. (2000). The diffusion of renewable energy technology: An analytical framework and key issues for research. *Energy policy*, 28(9), 625-640.
- Jensen, P. S., & Schmidt, T. D. (2011). Testing for cross-sectional dependence in regional panel data. *Spatial Economic Analysis*, 6(4), 423-450.
- Ji, Y. B., & Lee, C. (2010). Data envelopment analysis. *The Stata Journal*, 10(2), 267-280.
- Khan, M. A., Khan, M. Z., Zaman, K., & Naz, L. (2014). Global estimates of energy consumption and greenhouse gas emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 336-344.
- Khan, S. (2024). Mapping the digital divide: Bridging inequalities in access to information and technology. *Policy Journal of Social Science Review*, 2(02), 48-55.
- Khan, Y., Oubaih, H., & Elgourrami, F. Z. (2022). The effect of renewable energy sources on carbon dioxide emissions: Evaluating the role of governance, and ICT in Morocco. *Renewable Energy*, 190, 752-763.
- Kmenta, J., & Klein, L. R. (1971). *Elements of econometrics* (Vol. 655). New York: Macmillan.

- Kunkel, S., & Matthes, M. (2020). Digital transformation and environmental sustainability in industry: Putting expectations in Asian and African policies into perspective. *Environmental science & policy*, 112, 318-329.
- Levin, A. & Lin, C.F. (1992). Unit root test in panel data: asymptotic and finite sample properties, *University of California at San Diego*, Discussion Paper 92-93.
- Levin, A. & Lin, C.F. (1993). Unit root test in panel data: New results. *University of California at San Diego*, Discussion Paper, 93-56.
- Li, B. (2024). Leading role of natural resources, eco-efficiency assessment, and energy transition in environmental sustainability: A depth of digital transformation. *Resources Policy*, 94, 105145.
- Li, X., Liu, J., & Ni, P. (2021). The impact of the digital economy on CO₂ emissions: A theoretical and empirical analysis. *Sustainability*, 13(13), 7267.
- Lim, S., & Zhu, J. (2015). DEA cross-efficiency evaluation under variable returns to scale. *Journal of the Operational Research Society*, 66(3), 476-487.
- Lin, B., & Huang, C. (2023). Promoting variable renewable energy integration: The moderating effect of digitalization. *Applied Energy*, 337, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120891>
- Lohwasser, J. (2023). *STIRPAT analysis revisited-new insights and applications on the relationship of anthropogenic impacts with the environment* (Doctoral dissertation). Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.
- Ma, Q., Tariq, M., Mahmood, H., & Khan, Z. (2022). The nexus between digital economy and carbon dioxide emissions in China: The moderating role of investments in research and development. *Technology in Society*, 68, 101910.
- Mahalik, M. K., Mallick, H., & Padhan, H. (2021). Do educational levels influence the environmental quality? The role of renewable and non-renewable energy demand in selected BRICS countries with a new policy perspective. *Renewable Energy*, 164, 419-432.
- Marquardt, D. W. (1970). Generalized inverses, ridge regression, biased linear estimation, and nonlinear estimation. *Technometrics*, 12(3), 591-612.
- Misra, P., & Srivastava, R. (2024). Digital divide and sustainable development. İçinde *Digital Technologies to Implement the UN Sustainable Development Goals* (s. 451-472). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Nazari, Z., & Musilek, P. (2023). Impact of digital transformation on the energy sector: A review. *Algorithms*, 16(4), 211.
- Nong, D., Simshauser, P., & Nguyen, D. B. (2021). Greenhouse gas emissions vs CO₂ emissions: Comparative analysis of a global carbon tax. *Applied Energy*, 298, 117223.
- O'Connell, P. G. (1998). The overvaluation of purchasing power parity. *Journal of international economics*, 44(1), 1-19.
- OECD (2001). Understanding the Digital Divide. <http://www.oecd.org/internet/interneteconomy/1888451.pdf>. sayfasından erişilmiştir. Erişim Tarihi: 15.05.2023.
- Öztürk, L. (2002). Dijital uçurumun küresel boyutları. *Ege Academic Review*, 2(1), 1–10.
- Öztürk, Ş. (2019). *Bir işletmecilik tecrübesi çerçevesinde dijital dönüşüm modeli önerisi: enerji sektöründe uygulama ve danışmanlık hizmeti veren bir kobi örneği* (Yüksek Lisans tezi). <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/588612> Sayfasından erişilmiştir. Erişim Tarihi: 09.11.2024
- Parks, R. W. (1967). Efficient estimation of a system of regression equations when disturbances are both serially and contemporaneously correlated. *Journal of the American Statistical Association*, 62(318), 500-509.

- Paul, R. K. (2006). Multicollinearity: Causes, effects and remedies. *IASRI, New Delhi*, 1(1), 58-65.
- Pesaran, H.M. (2003). A simple panel unit root test in the presence of cross section dependence. University of Southern California, *Mimeo*.
- Pesaran, M. H. (2004). General diagnostic tests for cross section dependence in panels. Cambridge Working Papers. *Economics*, 1240(1), 1.
- Pesaran, M. H. (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of Applied Econometrics*, 22(2), 265-312.
- Pesaran, M. H. (2015). Testing weak cross-sectional dependence in large panels. *Econometric Reviews*, 34(6-10), 1089-1117.
- Qiu, Y., He, N., Yan, C., & Rao, Q. (2023). Whether the digital divide widens the income gap between China's regions?. *Plos One*, 18(2), e0273334.
- Ramanathan, R. (2003). *An introduction to data envelopment analysis: a tool for performance measurement*. Sage.
- Rizza, C. (2024). Digital Divide. İçinde A.C. Michalos (Hrsg.), *Encyclopedia of quality of life and well-being research* (S. 1619–1621). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Ruiz-Mendoza, B. J., & Sheinbaum-Pardo, C. (2010). Electricity sector reforms in four latin-american countries and their impact on carbon dioxide emissions and renewable energy. *Energy Policy*, 38(11), 6755–6766. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.046>
- Sánchez, J. J. V. (2018). Malmquist index with time series to data envelopment analysis. *Multi-Criteria Methods and Techniques Applied to Supply Chain Management*, 111.
- Sarwar, S., Yaseen, M. R., Makhdom, M. S. A., Sardar, A., Yasmeen, N., & Shahid, R. (2023). Global digital divide and environmental degradation in Africa. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(42), 96191-96207.
- Schneider, N. (2022). Unveiling the anthropogenic dynamics of environmental change with the stochastic IRPAT model: A review of baselines and extensions. *Environmental Impact Assessment Review*, 96, 106854.
- Sezgin, S., & Fırat, M. (2020). Covid-19 pandemisinde uzaktan eğitime geçiş ve dijital uçurum tehlikesi. *Açıköğretim Uygulamaları ve Araştırmaları Dergisi*, 6(4), 37–54. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1195678>
- Shah, M. A. H., & Ximei, W. (2024). Innovating for sustainability: Exploring the synergy between international digital trade, appeal mechanisms, renewable energy, and economic growth on ecological footprint in BRICST economies. *Environment, Development and Sustainability*, 1-26.
- Shahbaz, M., Wang, J., Dong, K., & Zhao, J. (2022). The Impact of digital economy on energy transition across the globe: The mediating role of government governance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112620>
- Slinker, B. K., & Glantz, S. A. (1985). Multiple regression for physiological data analysis: The problem of multicollinearity. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 249(1), R1-R12.
- Sohag, K., Al Mamun, M., Uddin, G. S., & Ahmed, A. M. (2017). Sectoral output, energy use, and CO₂ emission in middle-income countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 9754-9764.
- Sparks, C. (2013). What is the “digital divide” and why is it important?. *Javnost-The Public*, 20(2), 27-46.
- Stevenson, S. (2009). Digital divide: A discursive move away from the real inequities. *The Information Society*, 25(1), 1-22.

- Sun, W., & Ren, C. (2021). The impact of energy consumption structure on China's carbon emissions: Taking the Shannon–Wiener index as a new indicator. *Energy Reports*, 7, 2605-2614.
- Truong, T. C. (2022). The impact of digital transformation on environmental sustainability. *Advances in Multimedia*, 2022(1), 6324325.
- van Dijk, J. (2017). Afterword: The state of digital divide theory. İçinde Theorizing digital divides (S. 199-206). Routledge.
- Vial, G. (2021). Understanding digital transformation: A review and a research agenda. *Managing digital transformation*, 13-66.
- Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., ... & Fuso Nerini, F. (2020). The role of artificial intelligence in achieving the sustainable development goals. *Nature communications*, 11(1), 1-10.
- Wang, L., & Ramsey, T. S. (2024). Digital divide and environmental pressure: A countermeasure on the embodied carbon emissions in FDI. *Technological Forecasting and Social Change*, 204, 123398.
- Wang, Y. M., & Lan, Y. X. (2011). Measuring Malmquist productivity index: A new approach based on double frontiers data envelopment analysis. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(11-12), 2760-2771.
- Wei, Q., Zhang, J., & Zhang, X. (2000). An inverse DEA model for inputs/outputs estimate. *European journal of operational research*, 121(1), 151-163.
- Wöber, K. W. (2007). Data envelopment analysis. *Journal of Travel & Tourism Marketing*, 21(4), 91-108.
- Xiaole, W., & Piscunova, L. P. (2022). The challenges of digital transformation and renewable energy management for the green economy transition. *Российские регионы в фокусе перемен: сборник докладов. Том 1.—Екатеринбург, 2021*, 253-265.
- Xue, Y., Chen, L., Feng, Z., & Huang, Y. (2024). Breaking the resource curse: Heterogeneous effects of digital government. *Resources Policy*, 90, 104828.
- Yandle, B., Vijayaraghavan, M., & Bhattarai, M. (2002). The environmental Kuznets curve. *A Primer, PERC Research Study*, 2(1), 1-38.
- Yao, S., Zhang, S., & Zhang, X. (2019). Renewable energy, carbon emission and economic growth: A revised environmental Kuznets Curve perspective. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1338-1352.
- Yi, M., Liu, Y., Sheng, M. S., & Wen, L. (2022). Effects of digital economy on carbon emission reduction: New evidence from China. *Energy Policy*, 171, 113271.
- Yue, Q., Zhang, M., & Song, Y. (2024). Impact of digital divide on energy poverty across the globe: The mediating role of income inequality. *Energy Policy*, 195, 114349.
- Zhao, X., & Zhao, J. (2024). Digital finance and inequality in renewable energy technology innovation. *Energy & Environment*, 35(7), 3673-3702.
- Zhou, J., & Liu, W. (2024). Carbon reduction effects of digital technology transformation: Evidence from the listed manufacturing firms in China. *Technological Forecasting and Social Change*, 198, 122999.