

**FİNANSAL GELİŞMENİN, YEŞİL TEKNOLOJİK İNOVASYONLARIN
VE YENİLENEBİLİR ENERJİ KULLANIMININ KARBON
EMİSYONLARININ AZALTILMASINDAKİ ROLÜ¹**

*THE ROLE OF FINANCIAL DEVELOPMENT, GREEN TECHNOLOGICAL
INNOVATIONS AND RENEWABLE ENERGY USE IN CARBON EMISSIONS
REDUCTION*

Mehmet Hanifi ATEŞ*, Canan DAĞIDIR ÇAKAN,
Sabri KURTOĞLU*****

*Geliş Tarihi: 14.07.2024
(Received)*

*Kabul Tarihi: 25.12.2024
(Accepted)*

ÖZ: Dünya genelinde sıcaklıkların artması ve iklim değişikliğinin etkilerinin hızlanması iklim değişikliği ve küresel ısınma konularının, dünya çapında araştırmacılar, bilim insanları ve politika yapıcıları tarafından önemli bir konu haline gelmesine neden olmuştur. Birleşmiş Milletler tarafından belirlenen Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'nde (SKH) küresel ısınmayla mücadele etmek ve küresel sıcaklık artışlarını 1,5 °C ile sınırlamak için yeşil teknoloji inovasyonlarının, yenilenebilir enerjinin ve finansal gelişmenin kritik bir bileşenler olduğu ve SKH'leri gerçekleştirmede yardımcı olacağı düşünülmektedir. Çalışmada, finansal gelişme, yenilenebilir enerji tüketimi ve yeşil teknolojik inovasyonların, çevre korumasına nasıl katkıda bulunduğunu belirlemek amacıyla en çok karbon emisyonları değerlerine sahip 20 ülkenin karbon emisyonlarına finansal gelişmenin, yeşil teknoloji inovasyonlarının ve yenilenebilir enerji kullanımının etkileri incelenmektedir.

Ampirik analiz için 2000 ile 2021 yılları arasındaki dönemde yatay kesit bağımlılığını ve kesitler arasındaki heterojenliği dikkate alan CIPS-CADF birim kök testi, Westerlund (2007) eşbütünleşme testi ve CS-ARDL uzun-kısa dönem tahmincisi modeli kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, tüm değişkenlerin uzun dönemde eşbütünleşik olduğunu göstermektedir. Sonuçlar yenilenebilir enerjinin, finansal gelişmenin ve yeşil teknolojik inovasyonlarının çevresel bozulma üzerinde negatif bir etkisi olduğunu ve çevresel riskleri azaltmaya yardımcı olduğunu göstermektedir. Dumitrescu ve Hurlin (D-H) nedensellik testi sonuçlarına göre ise; finansal gelişme, yeşil teknoloji inovasyonları ve yenilenebilir enerji kullanımından karbon emisyonlarına doğru iki yönlü bir nedensel ilişkinin varlığını ortaya koymaktadır. Ayrıca tahmin sonuçları, gelecekte yeşil teknoloji inovasyonlarının ve yenilenebilir enerji

¹Çalışma, *Uluslararası Katılımlı Ekonomi Araştırmaları ve Finansal Piyasalar Kongresi*'nde (IERFM/8 2024 Mersin) sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

*Doktora Öğrencisi, Marmara Üniversitesi, Bankacılık ve Sigortacılık Enstitüsü, mehmetates@marun.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1916-3403.

**Doç. Dr., Marmara Üniversitesi, Finansal Bilimler Fakültesi, cdagidir@marmara.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7230-6373.

***Araştırmacı, Zürih Üniversitesi, sabrikurtoglu@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1446-4191.



OPEN ACCESS

© Copyright 2025 Ateş & Dağdır Çakan & Kurtoglu

kullanımının karbon emisyonlarının azalmasına katkıyı sağlayacak ana faktörler olacağını öngörmektedir.

Anahtar Kelimeler: Karbon Emisyonu, Yenilenebilir Enerji, Finansal Gelişme, Yeşil Teknoloji İnovasyonları, Panel Veri Analizi.

ABSTRACT: The increasing temperatures worldwide and the accelerated effects of climate change have led climate change and global warming to become significant concerns for researchers, scientists, and policymakers worldwide. It is believed that green technology innovations, renewable energy, and financial development are critical components in combating global warming and limiting global temperature increases to 1,5°C, as outlined in the Sustainable Development Goals (SDGs) set by the United Nations. This study aims to examine the effects of financial development, green technology innovations, and renewable energy use on carbon emissions (CE) for the top 20 countries with the highest carbon emissions, in order to determine how these variables contribute to environmental protection. In this regard, CIPS- CADF unit root tests, Westerlund (2007) cointegration test and CS-ARDL model, which takes into account cross-sectional independence and heterogeneity between cross-sections in the period between 2000 and 2021, were used for empirical analysis. The results indicate that all variables are cointegrated in the long run. Additionally, renewable energy and green technology innovations are shown to have a negative impact on environmental degradation and help reduce environmental risks. According to the results of Dumitrescu and Hurlin (D-H) causality test; It reveals the existence of a two-way causal relationship from financial development, green technology innovations and renewable energy use to carbon emissions. In addition, the forecast results predict that green technology innovations and the use of renewable energy will be the main factors that will make contribution to reducing carbon emissions in the future.

Key Words: Carbon Emissions, Renewable Energy, Financial Development, Green Technology Innovations, Panel Data Analysis.

EXTENDED ABSTRACT

This study aims to examine the long-term impact of renewable energy consumption (REC), financial development (FDI) and green technological innovations (TDPEnv) on carbon emissions in the twenty countries with the highest carbon emission values from 2000 to 2021. These countries produce more than 80% of the world's total carbon emissions (EI, 2023). Therefore, reducing carbon emissions in these countries is critical for global sustainable development and prosperity (Bouckaert et al., 2021).

Research Context and Motivation

According to the 2022 Energy Institute World Energy Statistics Report, the twenty countries with the highest carbon emissions are China, United States, India, Russia, Japan, Indonesia, Iran, Germany, Saudi Arabia, South Korea, Canada, Mexico, Brazil, South Africa, Turkey, Australia, United Kingdom, Italy, Poland and United Arab Emirates. These countries collectively contribute to over 80% of global carbon emissions, while the rest of the world accounts for only 20% (EI, 2023). Therefore, urgent measures are needed to reduce carbon emissions in these twenty countries to ensure sustainable development and prosperity.

Significant R&D investments are required to develop green technologies. A robust financial sector is necessary to support technological advancements. Financial development can influence environmental quality through various channels. According to the existing

literature, the financial sector aims to reduce carbon emissions by supporting technological advancements in the energy sector (Acheampong, 2019; Chen et al., 2019). Efforts to reduce carbon emissions through financial development can directly attract foreign investments, increase R&D investments, and reduce asymmetry and uncertainty in investments, thereby enhancing environmental sustainability (Hayat et al., 2018).

Literature Review

Previous research has focused either solely on the role of renewable energy consumption in reducing environmental degradation (Adebayo, Ghosh, et al., 2023; Akan, 2023; Bulut, 2017; Chen & Lee, 2020; Eluwole et al., 2020; Kartal et al., 2024; Kirikkaleli et al., 2022) or on the impact of growth determinants on environmental degradation (Acheampong et al., 2022; Al-Mulali et al., 2015; Ehigiamusoe & Lean, 2019; Nica et al., 2023; Pejovic et al., 2021; Sharma et al., 2021; Zhang et al., 2017). The impact of renewable energy consumption on the environment can be influenced by other factors, necessitating significant technological innovation to boost the development of renewable energy.

Contribution to Literature

This study contributes to the literature in several ways. Firstly, it is a pioneering effort to explore the effects of financial development, green technological innovations, and renewable energy consumption on carbon emissions in the top twenty emitters. These countries collectively account for 80% of global carbon emissions, 75.88% of global GDP, and 59.02% of the global population (WDI, 2023). Additionally, these leading emitters play a critical role in reducing global emissions, covering both developed and developing countries. Their commitments are essential to achieving the targets set in the Paris Agreement and reaching the net zero emissions goal by 2050 (Bouckaert et al., 2021).

Secondly, according to IEA (2015), clean technology innovations are not developed and disseminated equally across different countries and regions. Their impact can vary depending on social and economic conditions. Therefore, our study allows for specific policy recommendations tailored to the context and development levels of the top twenty emitters by using both collective and detailed country-specific examples.

Thirdly, the effects of financial development on energy consumption may differ based on various financial development indicators (Akan, 2023; Habiba et al., 2022; Park et al., 2018; Pata, 2018). This study uses the financial development index created by the IMF, which measures the development of financial institutions and markets in terms of access, depth, and efficiency, rather than simple ratios like the credit/GDP ratio or stock market capitalization/GDP ratio used in previous studies.

Fourthly, this study employs a range of second-generation estimators, including panel unit root tests like CIPS and CADF, the Westerlund cointegration test, the CS-ARDL long-term and short-term estimator, and the D-H panel heterogeneous causality method. For data analysis, we considered the period from 2000 to 2021 and used the CIPS-CADF unit root test, the Westerlund (2007) cointegration test, and the CS-ARDL long-short-term estimator model to account for cross-sectional independence and heterogeneity across sections.

Methodology and Findings

This study investigates the long-term impact of financial development, green technological innovations and renewable energy consumption on the carbon emissions of the top twenty emitters. Initially, cross-sectional independence and slope homogeneity in the datasets were

examined. Due to the heterogeneous nature and cross-sectional dependence of the datasets, the Westerlund (2007) panel cointegration test was conducted. After confirming the presence of cointegration, the CS-ARDL technique was used to examine long and short-term effects. Finally, the Dumitrescu and Hurlin (2012) bidirectional panel causality test was applied to determine the causal relationships between variables.

The findings indicate that renewable energy consumption and green technological innovations variables are negatively related to CO2 emissions in the long term. The negative impact of renewable energy consumption on CO2 emissions is consistent with previous studies (Anwar, Sharif, et al., 2021; Habiba et al., 2021; Shen et al., 2021). The negative impact of technological innovations on CO2 emissions is also consistent with previous studies (Cheng et al., 2021; Gyamfi et al., 2022; Jianguo et al., 2022). The causality test results confirm a bidirectional causal relationship from FDI, REC, and TDPEnv to CO2, consistent with findings in the literature (Adebayo, Ghosh, et al., 2023; Zhang et al., 2023).

Policy Implications and Future Research

Based on the findings, the first recommendation is to increase investments in technological innovation, particularly in the energy sector, to improve energy efficiency and increase the supply of green energy. Policies should be directed towards promoting the import of environmentally friendly technologies, with policymakers considering the significant role of renewable energy sources in the total energy mix and taking measures to limit CO2 emissions.

Secondly, financial development is crucial in the top twenty emitters. Long-term energy efficiency projects should be encouraged through financial support. A strong financial system should be developed as robust financial institutions are beneficial for developing energy-efficient projects.

Thirdly, our study confirms that renewable energy reduces carbon emissions. Renewable energy should be established with cost-saving technologies over time. Countries should focus on more cost-effective renewable energy sources like solar or biomass.

This study has certain limitations that can guide future research. While this study provides significant results, future research should consider various environmental sustainability parameters such as urbanization, foreign direct investments, trade, globalization, population, industrialization, and market capitalization. This study used CO2 emissions to measure environmental sustainability; future research can use different metrics like other greenhouse gas emissions or ecological footprint. Additionally, this study evaluated the top twenty countries with the highest carbon emissions; future studies can consider other regions like G20, OECD, MENA, EU, and Asia-Pacific.

1. GİRİŞ

İklim değişikliği, insanlık ve küresel dünyanın en önemli çevresel sorunlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Nitekim sürdürülebilir kalkınmada öncelikli alan olarak da kilit rol oynamaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) raporlarına göre, yüksek kirlilik içeren enerji kaynaklarının yanması sonucunda karbon emisyonları yıllık olarak %1.9 artmaktadır (IPCC, 2014). Yenilenemeyen enerji kullanımı yoluyla insani faaliyetlerden kaynaklanan kirlilik emisyonları, sera gazı artışında etkili olmaya devam etmektedir ve son 150 yılda

atmosferdeki sera gazlarındaki artışın neredeyse tamamının insani faaliyetleri ile ilişkili olduğu ifade edilmektedir (EPA, 2022).

Sera gazı emisyonları, özellikle karbondioksit emisyonları; araştırmacılar, politika yapıcılar ve ulusal ile uluslararası kuruluşlar tarafından gelecek nesillerin çevresel kalitesini artırmak amacıyla yakından takip edilmektedir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde sürdürülebilir bir ekonomik büyüme ve enerji arzı çeşitliliğinin sağlanmasına yönelik politika arayışları önemli konu haline gelmiş ve Kyoto protokolü ile sera gazının emisyonunun küresel ısınmanın en temel sebebi olduğu vurgusu yapılarak çevresel sürdürülebilirlik ve yenilenebilir enerji tüketiminin önemi ortaya konulmuştur. Kyoto protokolünde sera gazı olarak kabul edilen bileşikler içinde CO₂ atmosferdeki sera gazının %75'ine oluşturmakta iken sektörlere göre bakıldığında ise enerji sektörünün %73,2 en büyük paya sahip olmaktadır (Khezri vd., 2022). Küresel karbon emisyonlarını azaltmada enerji verimliliği öne çıkan faktör olduğundan dolayı yenilenebilir enerji kaynakları kirliliği azaltmak için önemli bir araç olarak kabul edilmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı tarafından yapılan projeksiyona göre, 2050 yılına kadar yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğin küresel olarak %44 oranında artması beklenmektedir (IEA, 2017).

Dünya Bankası'nın verilerine göre, 2021 yılı sonunda Çin, en yüksek CO₂ emisyonlarını oluşturan ülke konumunda bulunmakta ve onu Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Hindistan ve Rusya izlemektedir (WDI, 2023). Benzer şekilde Tablo1'de Enerji Enstitüsü Dünya Enerji İstatistikleri raporunda yer alan verilerine göre, enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının dağılımı incelendiğinde, Çin, ABD, Hindistan ve Rusya'nın yine önemli birer paya sahip olduğu görülmektedir (EI, 2023). Bu bağlamda, çoğu ülke belirli bir tarihe kadar karbon nötr bir ekonomi haline gelerek CO₂ emisyonlarını azaltmayı ve aynı zamanda yenilenebilir enerji kullanımını artırmayı hedeflemektedir (Adebayo, Ghosh, vd., 2023; Liu vd., 2022).

Tablo 1: Seçilmiş Ülkelerde Karbon Emisyon Miktarı (Metric Ton)

Ülke	2000	2021	2022	2000 payı	2021 payı	2022 Payı
Çin	3.328,0	10.523,0	10.550,2	14,1%	31,1%	30,7%
ABD	5.740,7	4.701,1	4.825,8	24,2%	13,9%	14,0%
Hindistan	959,8	2.552,8	2.595,8	4,1%	7,5%	7,6%
Rusya	1.452,8	1.581,3	1.457,5	6,1%	4,7%	4,2%
Japonya	1.230,0	1.053,7	1.065,7	5,2%	3,1%	3,1%
Endonezya	264,1	572,5	692,0	1,1%	1,7%	2,0%
İran	304,9	660,5	667,4	1,3%	1,9%	1,9%
Almanya	854,4	628,9	634,9	3,6%	1,9%	1,8%
Suudi Arabistan	277,0	575,3	612,5	1,2%	1,7%	1,8%
Güney Kore	437,2	603,8	592,4	1,8%	1,8%	1,7%
Kanada	533,1	527,4	519,7	2,3%	1,6%	1,5%
Meksika	370,3	373,8	505,9	1,6%	1,1%	1,5%
Brezilya	319,4	436,6	443,3	1,3%	1,3%	1,3%
Güney Afrika	371,6	438,9	420,4	1,6%	1,3%	1,2%
Türkiye	205,7	403,3	409,7	0,9%	1,2%	1,2%
Avustralya	355,1	369,4	376,3	1,5%	1,1%	1,1%
Birleşik Krallık	566,6	337,7	344,6	2,4%	1,0%	1,0%
İtalya	434,4	311,2	317,7	1,8%	0,9%	0,9%
Polonya	299,8	309,1	295,7	1,3%	0,9%	0,9%
BAE*	123,6	260,1	292,5	0,5%	0,8%	0,9%

Kaynak: Energy Institute Statistical Review of World Energy 2023

* Birleşik Arap Emirlikleri

Enerji Enstitüsü'nün 2022 Dünya Enerji İstatistik raporuna göre, dünyada enerji kaynaklarından en yüksek karbon salınımı yapan yirmi ülkesi (Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Hindistan, Rusya, Japonya, Endonezya, İran, Almanya, Suudi Arabistan, Güney Kore, Kanada, Meksika, Brezilya, Güney Afrika, Türkiye, Avustralya, Birleşik Krallık, İtalya, Polonya, Birleşik Arap Emirlikleri), toplam karbon emisyonlarının 80%'inden fazlasını oluştururken, geri kalan dünya ise 20% katkıda bulunmaktadır (EI, 2023). Bu nedenle bu yirmi ülkenin ürettiği karbon emisyonlarını azaltmak için acil önlemler alınmalıdır, böylece bu ekonomilerde sürdürülebilir kalkınma ve refah sağlanabilir. Çevresel bozulma her ne kadar küresel bir sorun olsa da ve tüm dünya çevresel kalitenin bozulmasından kaynaklanan tehditlere maruz kalsa da dünyayı bu tehditlerden kurtarma sorumluluğu büyük ölçüde sera gazı salınımına sahip olan ülkelere düşmektedir (Ergün & Polat, 2022; Shahbaz vd., 2018).

Son dönemde temiz teknoloji inovasyonları küresel karbon emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol oynamıştır (Anwar, Sharif, vd., 2021; Du vd., 2019).

Yeşil teknolojinin başlangıç teorisi, kirliliği kontrol etme, atıkları işleme, geri dönüşüm, izleme ve çeşitli değerlendirme yöntemlerini kapsamı gerektiğini öne süren Braun ve Wield (1994) tarafından belirlenmiştir. Uluslararası Enerji Ajansı'na göre, küresel ısınmayı azaltma stratejileri arasında enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji gibi yeşil teknolojilerin, küresel ısınmayı %60'tan fazla azaltmada öncü olması beklenmektedir (IEA, 2020). Bu nedenle yeşil teknoloji inovasyonları tüm dünya ülkeleri için hayati öneme sahiptir. Ancak farklı ülkelerde yeşil teknoloji inovasyonlarının benimsenme ve yayılma düzeyleri önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu farklılık yeşil teknoloji inovasyonlarının gerçek etkisinin bireysel ekonomik veya sosyal koşullara bağlı olarak değişebilmesinden kaynaklanmaktadır (Habiba vd., 2022).

Yeşil teknolojilerin geliştirilmesi için önemli Ar-Ge yatırımlarına ihtiyaç vardır. Bu hedefe ulaşmak için teknolojik ilerlemeyi desteklemek amacıyla güçlü bir finansal sektör gerekmektedir. Finansal gelişme çeşitli kanallar aracılığıyla çevre kalitesi üzerinde etkili olabilir.

1-Finansal gelişme sanayi ve fabrika faaliyetleri için gerekli sermayeleri sağlayarak çevre kirliliğine yol açabilir.

2-Finansal araçlar çevreyi iyileştirecek çevre dostu teknolojilere erişebilir.

3- Finansal gelişme çevresel projeler için daha az maliyetle daha fazla finansal kaynak sağlayabilir. Yani ekonomik ve finansal kalkınmadaki başarı için güçlü bir kurumsal sistemin gerekli olduğudur (Bayar vd., 2020; Majeed & Mazhar, 2019).

Mevcut literatüre göre enerji emisyonlarını izlemeye, finans sektörü enerji sektöründeki teknolojik ilerlemeyi destekleyerek karbon emisyonlarını azaltmayı amaçlamaktadır (Acheampong, 2019; Chen vd., 2019). Finansal kalkınmanın karbon emisyonlarını azaltma çabaları özellikle araştırma ve geliştirmeye (Ar-Ge) yapılan yatırımları arttırarak doğrudan yabancı yatırımı çekebilir ve yatırımlarda asimetri ve belirsizliği azaltarak çevresel sürdürülebilirliği artırabilir (Hayat vd., 2018).

Literatürde yer alan bazı araştırmalarda çevresel bozulmanın azaltılmasında yalnızca yenilenebilir enerji tüketimine odaklanılmıştır (Adebayo, Ghosh, vd., 2023; Akan, 2023; Bulut, 2017; Chen & Lee, 2020; Eluwole vd., 2020; Kartal vd., 2024; Kirikkaleli vd., 2022). Diğer grup araştırmalarda ise büyüme göstergelerinin çevresel bozulma üzerindeki etkisine odaklanılmıştır (Acheampong vd., 2022; Al-Mulali vd., 2015; Ehigiamusoe & Lean, 2019; Nica vd., 2023; Pejovic vd., 2021; Sharma vd., 2021; Zhang vd., 2017). Yenilenebilir enerji tüketiminin çevre üzerindeki etkisi diğer faktörlerden de etkilenebildiğinden dolayı yenilenebilir enerjinin gelişimini arttırmak için önemli ölçüde ileri teknoloji yeniliğine ihtiyaç duyulmaktadır. Öne sürülen argümanlar doğrultusunda, çalışmamız mevcut literatüre önemli katkılarda bulunmaktadır. İlk olarak bu çalışma, yirmi büyük karbon salınımına sahip ülkelerin finansal kalkınma, yeşil teknoloji inovasyonları, yenilenebilir enerji kullanımının çevresel etkilerini keşfetmeye yönelik öncü bir

girişimdir. Bu ülkelerin seçilmesinin nedeni, topluca küresel karbon emisyonlarının %80'ini, küresel GSYİH'nin %75,88'ini oluşturmaları ve küresel nüfusun %59,02'ine sahip olmalarıdır (WDI, 2023). Ayrıca karbon salınımında önde gelen bu ülkeler hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeleri kapsayarak küresel ölçekte emisyonları azaltmada kritik bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla bu ülkelerin taahhütleri, Paris Anlaşması'nda belirlenen hedeflerin ve 2050'ye kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için gerekli adımların odak noktası olması zorunludur (Bouckaert vd., 2021). İkinci olarak, temiz teknoloji inovasyonları, IEA (2015)'ya göre, farklı ülkeler ve bölgeler arasında eşit şekilde geliştirilip yayılmamaktadır. Bu inovasyonların etkisi, sosyal ve ekonomik koşullara göre değişebilir. Bu nedenle çalışmamız en yüksek karbon salınımına sahip yirmi ülkenin hem toplu hem de ayrıntılı örneklerini kullanarak, her ülkenin bağlamına ve farklı gelişim düzeylerine özgü belirli politika önerilerinin yapılabilmeye imkân tanır. Üçüncü olarak, finansal kalkınmanın enerji tüketimi üzerindeki etkilerinin farklı finansal gelişme göstergeleri tarafından farklı şekillerde olabileceği savunulmaktadır (Akan, 2023; Habiba vd., 2022; Park vd., 2018; Pata, 2018). Bu farklı finansal gelişme göstergelerinin karbon emisyonu üzerinde farklı etkilere sahip olabileceği anlamına gelir. Önceki çalışmaların çoğu finansal gelişmeyi genellikle özel kredi/GSYİH oranı veya hisse senedi piyasa değeri/GSYİH oranı gibi basit rasyolarla ölçerken, mevcut çalışmada IMF tarafından oluşturulan finansal kurumların ve piyasaların erişim, derinlik ve verimlilik açısından ne kadar gelişmiş olduğunu ölçen finansal kalkınma endeksi kullanılmıştır. Dördüncü olarak, çalışmamız CIPS ve CADF gibi panel birim kök testleri, Westerlund eşbütünleşme testi, CS-ARDL uzun dönem ve kısa dönem tahmincisi ve D-H panel heterojen nedensellik yöntemi gibi ikinci nesil tahminciler kümesini kullanmaktadır. Bu doğrultuda, veri analizi için 2000 ile 2021 yılları arasındaki dönemi dikkate alarak yatay kesit bağımsızlığını değerlendirmek ve kesitler arasındaki heterojenliği dikkate alan CIPS-CADF birim kök testi, Westerlund (2007) eşbütünleşme testi ve CS-ARDL uzun-kısa dönem tahmincisi modeli kullanılmıştır. Çalışmada finansal gelişme, yenilenebilir enerji tüketimi ve yeşil teknolojik inovasyonların, çevre korumasına nasıl katkıda bulunduğunu belirlemek amacıyla en çok karbon emisyonları değerlerine sahip yirmi ülkenin karbon emisyonlarına finansal gelişmenin, yeşil teknolojik inovasyonların ve yenilenebilir enerji kullanımının etkilerini incelenmiştir. Ayrıca tahmin sonuçları, gelecekte yeşil teknoloji inovasyonlarının ve yenilenebilir enerji kullanımının CO2 emisyonlarının azalmasına en büyük katkıyı sağlayacak ana faktörler olacağını öngörmektedir.

2. LİTERARÜR İNCELEMESİ

2.1. Yenilenebilir Enerji Kullanımı ve Karbon Emisyonu

Yenilenebilir enerji kaynakları, enerji ihtiyaçlarını karşılamının doğal bir yoludur ve çevreyi etkilemeden enerji üretirler. Yenilenebilir enerji kaynaklarının

faidaları göz önüne alındığında, araştırmacılar enerji kaynaklarını yenilenebilir ve yenilenemez olarak ayırmışlar ve bu farklı enerji kaynaklarının çevresel kaliteyi nasıl etkilediğini incelemişlerdir.

Anwar vd. (2021), ASEAN ülkeleri için MMQR modelini kullanmış ve yenilenebilir enerjinin karbon emisyonlarının etkisini azalttığını ifade etmişlerdir. Zhang vd. (2017), yenilenemeyen ve yenilenebilir enerji kullanımının emisyonları azaltmadaki etkinliğini (DOLS), FMOLS ve ARDL tekniklerini kullanarak inceledikleri çalışmada, yenilenebilir enerjinin Pakistan'da karbon emisyonları önemli ölçüde azalttığını bulmuştur. Jin ve Kim (2018), 1990-2014 döneminde 30 ülke için yaptıkları araştırmada yenilenebilir enerji kullanımının karbon emisyonlarını azalttığını ancak nükleer enerji kullanımının karbon emisyonlarını azaltmada etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Anwar vd. (2021), QARDL yöntemini kullanarak 1990-2018 yılları çeyreklik verilerine göre Çin'de yenilenebilir enerji kullanımının karbon emisyonlarını azalttığını ifade etmişlerdir. Habiba vd. (2021), CCEMG modelini kullanarak 1981-2017 döneminde G20 üye ülkelerinde sermaye piyasalarının ve yenilenebilir enerji tüketiminin çevresel bozulmayı azalttığını ifade etmişlerdir. Usman ve Makhdam (2021) 1990 ile 2018 arasında BRICS-T ülkelerinde yenilenebilir ve yenilenemez enerji tüketiminin karbon emisyonları üzerindeki etkisini FMOLS, AMG ve CCEMG yöntemleri analiz etmişlerdir. Analiz sonucunda elde edilen bulgulara göre yenilenemez enerji kullanımının karbon emisyonları arttırıcı bir etkisi olduğunu, ancak yenilenebilir enerjinin karbon emisyonları azaltıcı bir etkisinin olduğunu göstermiştir. Bayar vd. (2020) 1995-2017 dönemde AB üyesi ülkelerinin birincil enerji tüketiminin karbon emisyonlarını arttırdığını ifade etmişlerdir. Kirikkaleli vd. (2022), 1990-2017 döneminde ARDL yöntemi, FMOLS ve DOLS tahmincileri sonuçlarına göre Şili'de yenilenebilir enerjinin karbon emisyonları azaltmada olumlu katkısı olduğunu önermişlerdir. Shan vd. (2021) 1990-2018 döneminde Türkiye'de yenilenebilir enerji tüketiminin karbon emisyonu üzerindeki etkisini ARDL yöntemi ile analiz etmiştir. Analiz sonucunda yenilenebilir enerji kullanımının karbon emisyonlarının azalmasında olumlu katkısı olduğu tespit edilmiştir. Ganda (2019), GMM yöntemi ile elde edilen bulgulara göre 25 OECD üyesi ülkenin 2000-2014 yılları arasında yenilenebilir enerji tüketiminin karbon emisyonları üzerinde azaltıcı etkiye sahip olduğunu önermişlerdir.

2.2. Finansal Gelişmişlik Endeksi ve Karbon Emisyonu

Finansal sektörün kalkınması finansal hizmetlerin iyileşmesine ve yeşil büyümeyi artıracak yabancı yatırımcıları çekmeye imkân verir. Bu nedenle her ülke açısından finansal sektörlerinin çevreye duyarlı büyümeyi teşvik etmede aktif rol oynamasını sağlamak önem taşımaktadır (Ergün & Polat, 2022). Önceki çalışmaların sonuçları arasında tutarsızlıklar bulunmaktadır. Örneğin, bazı araştırmalar finans sektörü gelişiminin emisyon seviyelerini azalttığını savunurken (Acheampong,

2019; Hasni vd., 2023; Shahbaz vd., 2018); diğerleri bu gelişmenin karbon emisyonlarını artırdığını öne sürmektedir (Acheampong vd., 2020; Bayar vd., 2020; Habiba vd., 2022; Le vd., 2020; Shahbaz vd., 2016). Bir diğer grup ise, finansal kalkınmanın karbon emisyonları ile herhangi bir ilişkisinin olmadığını iddia etmektedir (Maji vd., 2017; Omri vd., 2015). (Kevser vd., 2022), CCE tahmincisi kullanarak yaptıkları analizde, biyokütle enerjisi kullanımının finansal gelişmişliği pozitif yönde etkilediği sonucuna ulaşmışlardır. (Doğan vd., 2022) çalışmalarında FMOLS ve DOLS tahmincilerinin sonuçlarına göre jeotermal enerji kullanımı finansal gelişmişliği olumlu yönde etkilerken, rüzgâr enerjisi kullanımının finansal gelişmişlik üzerinde istatistiki olarak anlamlı bir etkisinin olmadığını tespit etmişlerdir.

Shahbaz vd. (2018), Finansal gelişmenin ve doğrudan yabancı yatırımlarının Fransa'da karbon emisyonlarını azalttığı sonucuna ulaşmışlardır. Acheampong (2019), 46 Sahra Altı Afrika ülkelerinde özel sektöre sağlanan krediler aracılığıyla finansal gelişmenin karbon emisyonlarını pozitif yönde etkilediğini belirtmiştir. Ehigiamusoe ve Lean (2019), çalışmalarında 122 ülkeyi gelir gruplarına göre ayırdıkları panel veri analizinin sonuçlarına göre yüksek gelir grubundaki ülkelerde finansal gelişmenin karbon emisyonlarını azaltıcı etkiye sahip olduğu, orta ve düşük gelir grubundaki ülkelerde ise finansal gelişmenin karbon emisyonlarını arttırıcı etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bayar vd. (2020), 1995-2017 döneminde çalışmaya dahil edilen 11 AB üyesi ülkelerde finansal gelişmenin karbon emisyonlarını arttırdığını ifade etmişlerdir. Shahbaz vd. (2020), ARDL yöntemi ve nedensellik analizine göre Birleşik Arap Emirliklerin de finansal gelişmenin karbon emisyonlarını arttırdığı sonucuna ulaşmıştır. Habiba vd. (2021), G20 ülkelerinde sermaye piyasalarının ve finansal piyasaların gelişmişliğinin karbon emisyonları üzerinde etkisi incelemiştir. CCMEG yöntemi ile elde edilen bulgulara göre finansal gelişmenin karbon emisyonlarını arttırdığını, sermaye piyasaların gelişmişliğinin ise karbon emisyonlarını azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Anwar vd. (2022), FMOLS ve DMOLS tahmincileri ile elde edilen bulgulara göre 15 Asya ülkesinde finansal gelişmenin karbon emisyonları arttırdığını tespit etmişlerdir. Paramati vd. (2021), 1991-2016 dönemi için 25 OECD ülkesinde AMG ve FMOLS tahmincileri sonuçlarına göre finansal gelişmenin karbon emisyonlarını azalttığını tespit etmişlerdir. Wang vd. (2023), 124 ülke için finansal gelişmenin Ar-Ge harcamalarını arttırarak karbon emisyonlarını azaltıcı etki gösterdiğini belirtmiştir. Hasni vd. (2023), Asya-Pasifik ülkelerinde PMG-ARDL yöntemi sonuçlarına göre finansal gelişmenin ve finansal istikrarın karbon emisyonları üzerinde etkisinin azalma yönünde olduğunu belirtmişlerdir. Xu vd. (2023), 2010-2020 dönemi için 5 Asya ülkesinde CS-ARDL metodu sonuçlarına göre uzun dönemde finansal gelişmenin karbon emisyonlarını azalttığını belirtmişlerdir.

2.3. Yeşil Teknolojik İnovasyon ve Karbon Emisyonu

Teknolojik yenilikler, CO₂ emisyonları üzerinde kritik bir etkiye sahiptir; ülkeler, çevresel kaliteyi olumsuz etkileyen alanlarda verimli yöntemler geliştirme, enerji verimliliğini artırma ve enerji tüketimini azaltma gibi hedeflere ulaşmak için bu yenilikleri teşvik etmelidir. Ayrıca, mevcut enerji kaynaklarının kullanımını geliştirmek ve yeni yeşil enerji kaynaklarını ortaya çıkarmak için teknolojik yeniliklerden faydalanma potansiyeline sahiptirler (Ahmad & Zheng, 2021).

(Tekbaş & Yıldırım, 2023), gelişmekte olan ülkelerde teknolojik inovasyonların karbon emisyonlarını azalttığı sonucuna varmışlardır. Jianguo vd. (2022), OECD ülkelerinde teknolojik inovasyonların karbon emisyonları üzerinde negatif etkisi olduğunu sonucunu elde etmişlerdir. Khan vd. (2021), 19 AB üyesi ülkelerin yenilenebilir enerji kullanımı ve teknolojik inovasyonların karbon emisyonları üzerinde azaltıcı etkiye sahip olduğu sonucunu kantil regresyon yöntemi ile elde etmişlerdir. Cheng vd. (2021), Çin için 2005/Q1–2018/Q4 dönemi için Canonical Cointegrating Regression yöntemi (CCR), dinamik en küçük kareler (DOLS), FMOLS yaklaşımları ile karbon emisyonlarının yeşil teknolojik inovasyonlar ile azaldığını; Ma vd. (2021), 1995 ve 2019 yılları arasında Cross-Sectional ARDL (CS-ARDL) ve AMG yaklaşımları kullanılarak; Gyamfi vd. (2022), AMG ve CCEMG yaklaşımlarını kullanarak 1990 ile 2019 arasındaki dönemde BRICS ülkelerini incelemiş ve teknolojik yeniliğin karbon emisyonları üzerindeki azalan etkisini tespit etmişlerdir. Su vd. (2022), kantil regresyon yöntemi ile ABD'nin teknolojik gelişmeler ve yenilenebilir enerji tüketiminin karbon emisyonları üzerinde azaltıcı etkisini sunmuşlardır. Chen ve Lee (2020), 1996 ve 2018 yılları arasında 96 ülkenin örneklemini içeren bir çalışmada teknolojik yeniliğin çevresel kalite üzerindeki etkilerini incelemiş ve CO₂ emisyonları ile AR-GE yoğunluğunun ülkelerin ilişkili olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca, yüksek emisyon ve teknolojik inovasyona sahip ülkelerin karbon emisyonlarını azaltılmasında komşu ülkelere olumlu katkısı olduğu sonucuna varılmıştır. Ke vd. (2020), teknolojik yeniliğin 2014-2018 yılları Çin'in 280 şehrinde kirlilik emisyonlarını olumlu bir şekilde azalttığı bulunmuştur. Guo vd. (2021), Çin'de 1995-2017 dönemi için panel eşbütünleşme ve AMG tahmincisi sonuçlarına göre enerji sektöründeki yeşil teknolojik inovasyonların ve yatırımların karbon emisyonlarını azalttığını ifade etmişlerdir. Anwar vd. (2022), 1990-2014 dönemi için 15 Asya ülkesinde panel eşbütünleşme, FMOLS ve DOLS tahmincilerinin sonuçlarına göre teknolojik inovasyonların karbon emisyonlarını ve büyümeyi olumlu etkilediğini belirtmişlerdir. Shen vd. (2021), 1995-2017 dönemi için Çin'in 35 bölgesinde panel eşbütünleşme CS-ARDL modeli sonuçlarına göre yeşil teknoloji yatırımların karbon emisyonların azalmasına katkı sağladığı vurgulanmıştır. Hashmi ve Alam (2019), 1999-2014 dönemi için GMM tahmincisi sonuçlarına göre OECD ülkelerinde çevresel inovasyonların artmasının karbon

emisyonlarına azalmasına katkı sağladığı, Ganda (2019), 2000-2014 OECD ülkelerinde GMM tahmincisine göre yeşil teknoloji araştırmaları, AR-GE harcamaları ve patentlerinin emisyonu azalttığı; Paramati vd. (2021), 1991-2016 25 OECD ülkesinde AMG ve FMOLS tahmincilerine göre teknolojik inovasyonların azalmasına yardımcı olduğu sonucuna varılmıştır. Shan vd. (2021), 1990-2018 dönemi için ARDL yöntemi ile Türkiye'nin yeşil teknoloji inovasyonlarının karbon emisyonları üzerinde azaltıcı etkisi olduğunu tespit etmiştir. (Ullah vd., 2024), 17 OECD ülkesinin verilerini kullanarak yaptıkları analizde, teknolojik inovasyonların çevresel kalite üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Literatürde mevcut çalışmalar değerlendirildiğinde, yenilenebilir enerji kullanımının ve yeşil teknolojik inovasyonların karbon emisyonlarını azalttığı genel olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, birincil enerji tüketiminin emisyonlar üzerindeki etkisi, kullanılan yöntem ve ülke grubuna göre farklılık göstermektedir. Ayrıca enerji tüketiminin çevresel etkisi, ülkelerin ekonomik gelişmişlik düzeyi ile ilişkilendirilmekte olup, finansal gelişmişlik düzeyinin karbon emisyonlarına olan etkisi konusunda fikir birliği bulunmamaktadır. Bu etkide ülkelerin gelişmişlik seviyesinin belirleyici bir rol oynadığı görülmektedir.

Bu çalışmada, 2000'den 2021'e kadar olan dönemi kapsayan yirmi büyük karbon emisyon değerine sahip ülkelerin verileri dengelenmiş panel yöntemi kullanılarak FDI, REC ve TDPEnv'nin CO₂ üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Çalışmada CIPS ve CADF gibi panel birim kök testleri, Westerlund eşbütünleşme testi, CS-ARDL uzun dönem tahmincisi ve Dumitrescu and Hurlin (2012) (D-H) panel heterojen nedensellik yöntemi gibi ikinci nesil tahminciler kümesini kullanılmaktadır.

3. VERİ SETİ VE METODOLOJİ

3.1. Veri

Çalışmada en yüksek karbon emisyonuna sahip yirmi ülkenin (Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, Avustralya, Birleşik Krallık, Birleşik Arap Emirlikleri, Brezilya, Çin, Endonezya, Güney Afrika, Güney Kore, Hindistan, İran, İtalya, Japonya, Kanada, Meksika, Polonya, Rusya, Suudi Arabistan, Türkiye) 2000-2021 dönemi için yıllık verileri kullanılmıştır. Küresel karbon emisyonlarının %80'inden fazlası bu ülkeler tarafından üretilmektedir. Dolayısıyla iklim değişikliğini kontrol altına almak için bu büyük ülkelerin girişimleri son derece kritik bir öneme sahiptir.

Çalışmada finansal gelişmişlik endeksi (FDI), yenilenebilir enerji tüketimi (REC) ve yeşil teknoloji inovasyonları (TDPEnv) açıklayıcı değişkenler, karbon emisyonları (CO₂) ise bağımlı değişken olarak kullanılmıştır. Bu değişkenler ile ilgili özet bilgiler Tablo 2'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Tablo 2: Veri Seti ve Veri tabanları

Değişken	Açıklama	Notasyon	Veri Tabanı
Bağımlı Değişken	Kişi Başı CO2 Emisyon miktarı (metricton)	CO2	Dünya Bankası Kalkınma Göstergeleri (WDI)
Bağımsız Değişken	Kişi Başı Yenilenebilir Enerji Tüketimi	REC	Dünya Enerji İstatistikleri
Bağımsız Değişken	Finansal Gelişim Endeksi	FDI	IMF Veritabanı
Bağımsız Değişken	Çevresel Teknoloji İnovasyonu	TDPEnv	OECD İstatistik

Önceki araştırmalar finansal kurumların ekonomik faaliyetleri finanse etmede ve hanelere, işletmelere düşük maliyetli finansman sağlamada önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu durum enerjiye olan talebi artmasına ve çevresel bozulmaya neden olabilmektedir. Bu bağlamda, çalışma FDI ile CO2 emisyonları arasında pozitif bir korelasyon öngörmektedir. Diğer yandan, yenilenebilir veya yeşil enerji kaynaklarının benimsenmesi CO2 emisyonlarını azaltarak çevresel kaliteyi artırmaktadır. Mevcut literatüre dayanarak (Khan vd., 2021; Sheraz vd., 2021; Xu vd., 2023), yenilenebilir enerji kullanımının ve yeşil teknoloji inovasyonlarının karbon emisyonları ile negatif bir ilişki sergileyeceği hipotezi öne sürülmektedir. Bu model daha önceki araştırmalardaki bulgularla uyumlu bir şekilde (Adebayo, Ghosh, vd., 2023; Al-Mulali vd., 2024; Chen & Lee, 2020; Habiba vd., 2022; Shahbaz vd., 2016; Xu vd., 2023) şekillenmiştir. Mevcut araştırmada tahmin edilen model aşağıda açıklanmıştır. Bu çalışmada bağımlı değişken CO2'dir; bağımsız değişkenler ise FDI, REC ve TDPEnv'dir. Çalışmada kullanılan değişkenlerle oluşturulan modelin denklemi eşitlik (1) 'de gösterildiği gibidir.

$$\ln CO2_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln REC_{it} + \beta_2 \ln FDI_{it} + \beta_3 \ln TDPEnv_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Denklemin 1'de yer alan CO2 = Karbon Emisyonu, FDI = Finansal Gelişim, REC = Yenilenebilir Enerji Tüketimi, TDPEnv = Yeşil Teknolojik İnovasyonlar, β_0 , sabit terim katsayısını β_1 , β_2 , β_3 eğim katsayılarını, t , zaman periyodu, i , ülke, ε , hata terimini ifade etmektedir.

3.2. Araştırma Yöntemi

3.2.1. Yatay Kesit Bağımlılığı

Eğim heterojenliğinin anlaşılması regresyon analizini etkileyebilmekte ve hipotez testini etkileyebilmektedir. Bu nedenle eğim katsayılarının homojen veya heterojen olup olmadığını belirlemek için Pesaran ve Yamagata (2008) testi kullanılmıştır. Panel verilerin göstergeler arasında meydana gelebilen ve önyargılı sonuçlara yol açabilen bir yatay kesit bağımlılığı (CD) olduğu varsayılır (Pesaran, 2007a). Mevcut çalışmalara dayanarak panel veri modellerinin yüksek CD göstermesi gerektiği savunulmaktadır (Fareed vd., 2022). Ülkeler arasındaki önemli ekonomik ve finansal bağlantılar göz önüne alındığında, seçilen ülkeler arasındaki

yatay kesit bağımlılığının değerlendirilmesi önemli bir unsur olacaktır (Wang vd., 2021). Panel veri analizleri için CD testleri yapmak önemli olduğundan, çalışmada (Breusch & Pagan, 1980), (Pesaran, 2004), (Pesaran vd., 2008) ve (Baltagi vd., 2012) LM CD testlerini kullanılmıştır. (Pesaran, 2004) CD testinin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi sunulmuştur.

$$CSD = \sqrt{\frac{2T}{N(N-1)}} \left(\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \hat{p}_{ij} \right) \sim N(0,1)_{i,j} \quad (2)$$

Denklem (2) de \hat{p}_{ij} basit regresyon tahminlerinden elde edilen her çift hata serisi arasındaki korelasyonu gösterir. Yatay kesit bağımlılık testinin boş hipotezi aşağıdaki gibidir.

$$H_0: p_{ij} = corr(\mu_{it} + \mu_{jt}) = 0 \forall i \neq j \quad (3)$$

3.2.2. Birim Kök Testi

Küreselleşme nedeniyle ülkeler arasındaki temel bağımlılıklar dikkate alındığında, birinci nesil panel birim kök testleri, yatay kesit bağımlılık etkilerini, boyut özelliklerinin eksikliğini, heterojenliği ve sıfır hipotezin aşırı reddedilmesi sorunlarını göz ardı ettiği için geçersiz hale gelmiştir. Bu nedenle (Pesaran, 2007b) tarafından geliştirilen ikinci nesil birim kök testleri olan yatay kesit Im, Pesaran ve Shin (CIPS) ve yatay kesitli genişletilmiş Dickey-Fuller (CADF) gibi testler kullanılarak ele alınmaktadır. Bu yaklaşım, eşitlik (4)'e birinci farkları eklendiğinde eşitlik (5) aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\sigma Z_{it} = \gamma_i + \Delta_i Z_{i,t-1} + \delta_i \bar{Z}_{t-1} + \sigma_i \varphi \bar{Z}_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

$$\sigma Z_{it} = \gamma_i + \Delta_i Z_{i,t-1} + \delta_i \bar{Z}_{t-1} + \sum_{j=0}^p \sigma_{i,j} \varphi \bar{Z}_{t-j} + \sum_{j=1}^p \varphi_{i,j} \varphi Z_{i,t-j} \varepsilon_{it} \quad (5)$$

$\varphi Z_{i,t-j}$ ve \bar{Z}_{t-j} sırasıyla ortalama seviye gecikmiş ve birinci farkı gösterir. Ayrıca, CIPS istatistiği, önceki değerlerin basit bir ortalaması alınarak hesaplanır. Pesaran (2007b) tarafından önerilen CIPS testinin matematiksel gösterimi aşağıda gibidir;

$$CIPS(N, T) = N^{-1} \sum_{i=1}^N t_i(N, T) \quad (6)$$

Tüm N ülke için T zaman aralığında geçerli olmak üzere $t_i(N, T)$ CADF regresyonundaki t-istatistiklerini gösterir.

3.2.3. Eşbütünleşme Testi

Düzeyde durağan olmayan parametreler arasında uzun dönemli bir ilişkinin varlığı eşbütünleşme testleri yardımı ile sınanabilmektedir. Eşbütünleşme yaklaşımı parametreler arasında uzun dönemli bağlantıların olup olmadığının yani

parametrelerin zaman içinde birlikte hareket edip etmediğinin belirlenmesini sağlar. Değişkenler arasındaki uzun dönemli bağlantıları incelemek için Westerlund (2007) panel eşbütünleşme yaklaşımlarını kullanılmıştır. Westerlund (2007) yöntemi hem yatay kesit bağımlılığını hem de heterojenliği dikkate alması nedeniyle diğer birinci nesil testlere göre ikinci nesil bir yöntem olarak adlandırılmaktadır ve panel eşbütünleşme analizinde oldukça avantajlıdır. Bu nedenle bu çalışmada, daha güvenilir ve tutarlı sonuçlar üretmek için CD sorununu uygun şekilde ele alan Westerlund (2007) tarafından geliştirilen ikinci nesil uzun dönemli eşbütünleşme testi kullanılmıştır. Bu eşbütünleşme testi şu şekilde açıklanmaktadır:

$$\begin{aligned} \varphi X_{it} = & \lambda_i m_t + \varphi_i (X_{i,t-1} - \theta_i Y_{i,t-1}) + \sum_{j=1}^p \varphi_{i,j} \varphi X_{i,t-j} \\ & + \sum_{j=0}^p \eta_{i,j} \varphi Y_{i,t-j} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (7)$$

Denklemden m_t yaklaşık belirlenmiş bileşenleri hesaplayan $(1 - t)$ ' gösterirken λ_i bilinmeyen parametre vektörünü gösteren $(\lambda_{1i}, \lambda_{2i})$ ' temsil eder.

3.2.4. CS-ARDL Modeli

Kısa ve uzun vadeli ilişkiyi değerlendirmek için Chudik ve Pesaran (2015) tarafından başlatılan CS-ARDL yöntemini kullanılmıştır. CS-ARDL tahmincisi, serilerin I(0), I(1) veya ikisinin karışımı olarak eşbütünleşik olup olmadığını kapsamlı bir şekilde değerlendirir. CS-ARDL ikinci nesil ekonometrik model olarak tanımlanmakta ve endojenlik, eğim heterojenliği ve CD gibi birçok metodolojik zorluğu dikkate almaktadır. Eğim katsayıları farklı olsa da ortalama grup tahminlerine olanak tanınması sayesinde modelde gecikmeli bağımlı parametre eklenmesi, mevcut olan zayıf dışsal değişkenlik sorununun da aşılabileceğini sağlamaktadır. Araştırmacılar, gecikmiş yatay kesit ortalamaları ile destekleyerek endojenlik endişesinin önemli ölçüde azaltılabileceğini iddia ederek CS-ARDL'yi tahmin etmek için aşağıdaki regresyonu kullanmaktadır.

$$y_{it} = \alpha_i + \sum_{l=1}^{p_y} \lambda_{l,i} y_{i,t-l} + \sum_{l=0}^{p_x} \beta_{l,i} x_{i,t-l} + \sum_{l=0}^{p_\varphi} \varphi'_{l,i} z_{i,t-l} + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

Gecikmiş kesit ortalamasının gösterildiği yerde, ortalama grup tahminlerinin uzun vadeli katsayıları şu şekildedir:

$$\hat{\theta}_{CS-ARDL,i} = \frac{\sum_{l=0}^{p_x} \hat{\beta}_{l,i}}{1 - \sum_{l=0}^{p_y} \hat{\lambda}_{l,i}}, \quad \hat{\theta}_{MG} = \frac{N^1}{\sum_{N=1}^N \dots \sum_{i=1}^N \hat{\theta}_{MG}} \quad (9)$$

$$\Delta y_{it} = \phi_i [y_{it-1} - \hat{\theta}_i x_{i,t}] - \alpha_i \sum_{l=1}^{p_y-1} \lambda_{l,i} \Delta_l y_{i,t-1} + \sum_{l=0}^{p_x} \beta_{l,i} \Delta_l x_{i,t-1} - \sum_{l=0}^{p_\varphi} \varphi'_{l,i} \Delta_l \bar{Z}_{i,t-1} + u_{it} \quad (10)$$

ϕ_i , gecikmeli artırma ile işletilen CCE ortalama grup tahmincilerinin hata düzeltme ayarlama hızıdır ve boyut, güç ve yanlılık açısından iyi çalışmaktadır (Chudik & Pesaran, 2015). Bununla birlikte, $t < 50$ olduğunda, araştırmacılar negatif bir yanlılık göstermektedir. Buna dayanarak, Chudik ve Pesaran (2015), Dhaene ve Jochmans (2015) tarafından kurulan bölünmüş panel jackknife tekniğini küçük örneklem büyüklüğünün yanlılığını azaltmak için tanımlamışlardır. Jackknife yaklaşımı aşağıdaki denklemlerle belirlenmektedir:

$$\hat{\pi}_{MG} = \frac{2\hat{\pi}_{MG} - 1}{2(\hat{\pi}_{MG}^a + \hat{\pi}_{MG}^b)} \quad (11)$$

CS-ARDL modelini tahmin ettikten sonra, uzun dönem nedensellik bağlantısını analiz etmek için bir Dumitrescu ve Hurlin (D-H) panel nedensellik yöntemi kullanılmıştır.

3.2.5. Dumitrescu ve Hurlin (D-H) Nedensellik Testi

Bu çalışmada CO₂, REC, FDI ve TDPE_{env} arasındaki nedensellik bağlantılarını incelemek için Dumitrescu ve Hurlin (2012) tarafından heterojen paneller için geliştirilen panel Granger nedensellik testi kullanılmıştır. Bu testin uygulamasının nedeni, yatay kesit bağımlılığı ve heterojenlik konusunu ele almasının yanında, küçük örnek veri setlerinde güçlü ve güvenilir tahminler üretme kabiliyetine sahip test olmasıdır. Panel D-H nedensellik testinin matematiksel formu aşağıdaki gibidir:

$$X_{it} = \alpha_i + \sum_{j=1}^J \lambda_i^j X_{i(t-j)} + \sum_{j=1}^J \beta_i^j Z_{i(t-j)} + \mu_{it} \quad (12)$$

X ve Z tahmin edilen gözlemlenir değişkenleri temsil eder; β_i^j ve λ_i^j OLS regresyonu ve otoregresif tahminleri gösterir ve bunların bireysel i kesitlerine göre değiştiği varsayılır. Bu testin H_0 boş hipotezi, Wald istatistik ortalaması ile tahmin edilir ve aşağıdaki gibi önerilmiştir:

$$W_{N,T}^{HNC} = N^{-1} \sum_{i=1}^N W_{i,T} \quad (13)$$

$W_{i,T}$, her i kesit için ayrı Wald test istatistiklerini gösterir. D-H nedensellik testinin boş ve alternatif hipotezleri şu şekilde oluşturulur:

$$H_0: \delta_i = 0 \quad \forall i \quad (14)$$

$$H_1: \begin{cases} \delta_i = 0 \text{ tüm } i \text{ için } i = 1, 2, 3, 4, \dots, N_i \\ \delta_i \neq 0 \text{ tüm } i \text{ için } i = N_1 + 1, 2, 3, 4, \dots, N \end{cases} \quad (15)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Panel veri analizinde eğitim heterojenliğinin test edilmesi ve yatay kesit bağımlılığı, en önemli konular olarak kabul edilir (Zhen vd., 2023). Yatay kesit bağımlılığı sorunu, panelde ortak şoklar ve gözlenmeyen faktörlerden kaynaklanır; benzer şekilde, ülkeler arasındaki ekonomik entegrasyon da bu soruna kaynaklık eder (Adebayo vd., 2023). Bu nedenle olası heterojenlik ve yatay kesit bağımlılığını incelemek için (Pesaran & Yamagata, 2008) yatay kesit bağımlılığı testlerine dayalı eğitim heterojenliği kullanılmıştır. Pesaran vd. (2008) yatay kesit bağımlılık testinde boş hipotez, kesitler arası bağımlılığın olmadığını, alternatif hipotez ise kesitler arası bağımlılığın var olduğunu belirtmektedir. Tablo 3'ten görüleceği üzere sonuçlar, eğitim heterojenliği olmadığına dair boş hipotezinin reddedildiğini göstermektedir. Tablo 4 ve Tablo 5'teki sonuçlar, Breusch-Pagan LM, Pesaran-scaled LM ve Pesaran (2004) CD'deki p değeri kesitsel bağımlılığı doğrulamakta olup, boş hipotezi %1 anlamlılık düzeyinde başarılı bir şekilde reddedilmiştir. Bu sonuçlar kesitlerin birbirlerine olan bağımlılığını gösterir ve herhangi bir faktördeki bir şokun bir ülkede diğer ülkeleri de etkileyeceği sonucuna varılmasını sağlar.

Tablo 3: Eğitim Heterojenlik Test Sonuçları

Bağımlı Değişken CO2			
Delta $\hat{\Delta}$	Olasılık Değeri	Düzeltilmiş $\hat{\Delta}_{adj}$	Olasılık Değeri
9.178	0.000	10.440	0.000

Tablo 4: Pesaran (2004) Yatay Kesit Bağımlılığı Testi

Değişkenler	Test İstatistiği	Olasılık Değeri
CO2	12.803	0.000
RECPT	10.416	0.000
FDI	23.922	0.000
TDPEnv	38.892	0.000

Tablo 5: Yatay Kesit Bağımlılığı Testi

Bağımlı Değişken CO2		
Test	Test İstatistiği	Olasılık Değeri
Breusch-Pagan LM Test (1980)	2175.628	p < 0.05
Pesaran scaled LM Test (2004)	101.8606	p < 0.05
Pesaran vd. LM _{adj} - CD Test (2008)	3.571284	p < 0.05

Yukarıdaki kriterlere dayanarak, kesitler arası bağımlılığın varlığı sonucuna varıldığından durağanlığı test etmek için ikinci nesil panel birim testinin kullanılması önemlidir. Son dönemdeki çalışmaların bir çoğunda değişkenlerin durağanlık seviyesini belirlemek için birinci nesil birim kök testi yöntemlerinin uygun olmadığını ortaya koyulmaktadır ve yatay kesit bağımlılığının varlığında ikinci nesil birim kök testi yöntemlerinin uygulanmasını önerilmektedir (Gyamfi vd., 2022). Bu nedenle, ele alınan değişkenlerin durağanlık seviyesini incelemek için CADF ve CIPS yöntemlerini uygulanmış ve sonuçlar Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6: Birim Kök Testi Sonuçları

Değişkenler	CIPS		CADF	
	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)
CO2	-1.49326	-2.8065***	-1,47590	-3.7690**
RECPT	-1.74495 -2.23308	-2.81423***	-2.62303	-5.67572***
FDI	-2.05824	-3.42427***	-1.30635	-3.45168**
TDPEnv	-1.92708	-2.58964***	2.07207	-4.01950**

Not: **ve *** sırasıyla %5 ve %1 anlamlılık seviyelerini göstermektedir.

Tablo 6'da sunulan birim kök testi sonuçları, birinci farkta durağanlık hipotezinin reddedildiğini göstermektedir. Sonuçlara bakıldığında, çalışmaya dahil edilen tüm değişkenlerin I(1) seviyesinde durağan olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, değişkenler arasındaki eşbütünlüşmeyi belirlemek ve uzun dönemli ilişkiyi kontrol etmek için heterojenlik ve yatay kesit bağımlılığı sorununu dikkate alan Westerlund (2007) eşbütünlüşme testi uygulanmıştır. Eşbütünlüşme testinin sonuçları Tablo 7'de sunulmuştur. Westerlund eşbütünlüşme testi sonuçları, çoğu istatistikte %5 anlamlılık düzeylerinde hiçbir eşbütünlüşme olmadığını reddetmekte ve incelenen değişkenler arasında eşbütünlüşmenin varlığını doğrulamaktadır. Böylece 2000-2021 yılları arasında en yüksek karbon emisyonu değerlerine sahip ülkelerin FDI, REC, TDPEnv ve CO2 değerlerinin eşbütünlüşük olduğunu sonucu elde edilmektedir.

Tablo 7: Westerlund Panel Eşbütünlüşme Sonuçları**Bağımlı Değişken CO2**

Test	Test İstatistiği	Olasılık Değeri
Westerlund (2007)	-1.9940	0.0231

Kısa vadeli ve uzun vadeli etkileri değerlendirmek için CD-ARDL modeli kullanılmıştır. Modelde finansal gelişme, yenilenebilir enerji ve yeşil teknolojik inovasyonlar gibi değişkenler incelenmiş ve bu değişkenlerin farklı zamanlardaki etkileri araştırılmıştır. Finansal gelişmenin uzun dönemde anlamlı bir etkiye sahip olmadığını tespit edilmiştir. Yenilenebilir enerjinin ve yeşil teknolojik inovasyonların

karbon emisyonları üzerinde uzun dönemde negatif bir etkiye sahip olduğu sonucu elde edilmiş ve bulguların önceki çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür (Acheampong, 2019; Anwar, Sharif, vd., 2021; Cheng vd., 2021; Habiba vd., 2021; Hasni vd., 2023; Jianguo vd., 2022; Ke vd., 2020; Paramati vd., 2021; Shen vd., 2021; Usman & Makhdum, 2021). Yenilenebilir enerji kullanımı ve yeşil teknolojik inovasyonların karbon emisyonları üzerinde kısa dönemde negatif ve bir etkiye sahip iken finansal gelişmenin kısa dönemde anlamlı bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 8: CS-ARDL Tahminci Sonuçları

Değişkenler	Uzun Dönem		Kısa Dönem	
	Katsayı	p-value	Katsayı	p-value
REC	-0.015304	0.027	-0.027288	0.032
FDI	-0.03511	0.179	-0.060312	0.204
TDPEnv	-0.612452	0.000	-1.146106	0.000

Dumitrescu ve Hurlin (2012) panel nedensellik testi, tüm açıklayıcı değişkenler ile karbon emisyonları arasındaki nedensel etkileri belirlemek için kullanılmıştır. Tablo 9'da verilen sonuçlar, FDI'dan CO2'ye, REC'ten CO2'ye, TDPEnv'den CO2'ye arasında iki yönlü bir nedensellik olduğunu belirtmektedir. Bu ampirik sonuçların daha önceki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür (Adebayo, Ghosh, vd., 2023; Zhang vd., 2023).

Tablo 9: Nedensellik Testi Sonuçları

H ₀	W-Stats	Z- bar Stats	Olasılık Değeri	Sonuç
REC ≠ CO2	3.3262	7.3562	0.0000	REC ↔ CO2
CO2 ≠ REC	1.9649	3.0512	0.0023	
FDI ≠ CO2	2.7420	5.5086	0.0000	FDI ↔ CO2
CO2 ≠ FDI	2.5007	4.7456	0.0004	
TDPEnv ≠ CO2	6.0634	16.0119	0.0000	TDPEnv ↔ CO2
CO2 ≠ TDPEnv	2.8858	5.9636	0.0000	

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada 2000-2021 döneminde en yüksek karbon emisyon değerlerine sahip yirmi ülkenin yenilenebilir enerji kullanımının (REC), Finansal gelişmenin (FDI) ve yeşil teknolojik inovasyonlarının (TDPEnv) karbon emisyonlarını sınırlaması üzerindeki uzun vadeli etkisi incelenmiştir. İlk olarak veri setlerinde yatay kesit bağımlılığı ve eğim homojenliği araştırılmıştır. Daha sonra veri setlerinin heterojen doğası ve yatay kesit bağımlılığın varlığı nedeniyle Westerlund (2007) panel eşbütünlük testi uygulanmıştır. Eşbütünlüğün varlığı tespit edildikten

sonra uzun ve kısa dönem etkileri incelemek için CS-ARDL tekniğini kullanmıştır. Son olarak Dumitrescu ve Hurlin (2012) çift yönlü panel nedensellik testi, değişkenler arasındaki nedensellik ilişkisini elde etmek için uygulanmıştır.

Elde edilen bulgulara göre, REC ve TDPE_{env}'in uzun dönemde CO₂ emisyonları ile negatif ilişkili olduğu tespit edilmiştir. REC ve TDPE_{env} kısa dönemde de CO₂ emisyonları üzerinde negatif etkiye sahipken FDI'nın hem uzun dönemde hem de kısa dönemde CO₂ emisyonları üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varılmıştır. Literatürde yer alan mevcut çalışmaların sonuçlarına benzer şekilde, TDPE_{env} ve REC'in CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi negatiftir. Bu sonuçlar, teknolojik yeniliklerin enerji verimliliğini artırarak ve kaynak kullanımını iyileştirerek, araştırmaya dahil olan ülkelerdeki CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayacağını göstermektedir. Elde edilen sonuçlardan yenilenebilir enerji kullanımının CO₂ emisyonlarına negatif etkisi olduğu sonucu (Anwar, Sharif, vd., 2021; Habiba vd., 2021; Shen vd., 2021) çalışmaları ile uyumlu; teknolojik inovasyonların CO₂ emisyonlarına negatif etkisi olduğu sonucu ise (Cheng vd., 2021; Gyamfi vd., 2022; Jianguo vd., 2022) çalışmalarının sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Nedensellik testinin bulguları, FDI, REC ve TDPE_{env}'den CO₂'ye iki yönlü iki yönlü bir nedensel ilişkinin doğrulandığını ortaya koymaktadır ve bu sonuçların literatürde yer alan (Adebayo, Ghosh, vd., 2023; Zhang vd., 2023) çalışmalarının sonuçları ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerinde uzun ve kısa vadeli olumsuz etkiler yarattığını bulunması nedeniyle yenilenebilir enerji girişimlerini destekleyen bir politika çerçevesi geliştirme ihtiyacı bulunmaktadır. Bulgularımıza göre ilk öneri, özellikle enerji sektöründe teknolojik yenilik alanındaki yatırımları artırmaktır; böylece enerji etkinliğini artırılarak yeşil enerji arzının artması sağlanabilir. Politikalar çevre dostu teknolojilerin ithalatını teşvik etmeye yönlendirilebilir, politika yapıcılar yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji karışımındaki önemli rolünü dikkate alarak ve CO₂ emisyonlarını sınırlamak için önlemler almalıdır. Hükümet teşvikleri ve destekli fonlar, özel sektör yatırımlarını yenilenebilir enerji alanında teşvik etmek için düşük faizli hibe ve krediler sunabilir. Yenilenebilir enerji üretim sektörlerinin düşük maliyetli enerji kaynaklarını geliştirebilmesi için, ülkelerindeki hükümetler AR-GE projelerine önemli miktarda fon yatırmalı ve tarifeleri azaltmalıdır.

İkinci olarak, finansal gelişme, en yüksek karbon emisyon değerlerine sahip yirmi ülkede kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda finansmana bağlı uzun vadeli enerji verimliliği yüksek projeler teşvik edilmelidir. Ayrıca güçlü finansal kurumlar, enerji verimliliği yüksek projelerin geliştirilmesinde faydalı olduğundan, sağlam bir finansal sistem geliştirilmelidir. İlgili ülkelerin merkezi otoriteleri, finansal gelişimi çevre dostu yatırımları artırmak için politikalarla ilişkilendirmelidir.

Üçüncü olarak, çalışmamız yenilenebilir enerjinin karbon emisyonlarını azalttığını doğrulamaktadır. Yenilenebilir enerjinin zamanla maliyet tasarruflu teknolojilerle kurulması gerekmektedir. Ülkeler, güneş veya biyokütle gibi daha az maliyetli yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklanmalıdır. Bu yönlendirmeler, enerji verimliliğine ve sürdürülebilir büyümeye katkı sağlayacak ve emisyonlarla mücadeleyi destekleyecektir.

Bu çalışmanın bazı kısıtları gelecekteki çalışmaların şekillendirilmesinde yol gösterici olacaktır. Mevcut çalışma kayda değer sonuçlara sahip olmasına rağmen, gelecekteki araştırmaların kentleşme, yabancı doğrudan yatırımlar, ticaret, küreselleşme, nüfus, sanayileşme, sermaye piyasası kapitalizasyonu gibi çeşitli çevresel sürdürülebilirlik parametrelerini kullanarak yapılması gerekmektedir. Bu çalışma CO2 emisyonlarını çevresel sürdürülebilirlikle ölçmek için kullanmıştır; gelecekteki araştırmalar diğer sera gazı emisyonları, ekolojik ayak izi gibi farklı ölçütleri kullanabilir. Ek olarak bu çalışmada en yüksek karbon emisyon değerlerine sahip yirmi ülkeyi değerlendirilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda G20, OECD, MENA, AB ve Asya-Pasifik gibi diğer bölgeler de kullanılabilir. Ayrıca bu çalışmada teknolojik inovasyonun tek bir göstergesi kullanılmıştır; gelecekteki araştırmalar hükümetin AR-GE harcamalarını, küresel inovasyon endeksini ve patent başvurusu sayısını içerebilir.

Etik Beyan

Bu çalışmada “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında belirtilen tüm kurallara uyulduğu beyan edilmiştir.

Etik Kurul Onayı

Araştırmanın etik kurul izni gerektirmeyen araştırmalardan olduğu beyan edilmiştir.

Çıkar Çatışması ve Finansal Katkı Beyanı

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması ve finansal katkı beyan edilmemiştir.

Yazarlık Katkı Beyanı

Çalışmanın tüm aşamaları yazarlar tarafından tasarlanmış ve hazırlanmıştır.

Kuramsal çerçeve, C.D.Ç. ve M.H.A.; metodoloji, M.H.A., S.K.; yazılım, M.H.A., S.K.; yazma-inceleme ve düzenleme, M.H.A., C.D.Ç. ve S.K.; denetim, C.D.Ç. Tüm yazarlar makalenin yayımlanmış halini okumuş ve onaylamıştır. Tüm yazarlar son makaleyi okumuş ve onaylamıştır. Mehmet Hanifi Ateş (%40), Canan Dağdır Çakan (%30), Sabri Kurtoğlu (%30).

Teşekkür Açıklaması

Değerli geri bildirimleri ve yapıcı yorumları bu makalenin geliştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunacak isimsiz hakemlere içten teşekkürlerimizi sunarız. Kapsamlı ve anlayışlı incelemeleri, bu makalenin son halini şekillendirmede önemli

bir rol oynayacaktır. Ayrıca editör ekibine değerlendirme süreci boyunca rehberlik ve destekleri için minnettarız.

KAYNAKÇA

- Acheampong, A. O. (2019). Modelling for insight: does financial development improve environmental quality?. *Energy Economics*, 83, 156-179.
- Acheampong, A. O., Amponsah, M., & Boateng, E. (2020). Does financial development mitigate carbon emissions? Evidence from heterogeneous financial economies. *Energy Economics*, 88, 104768.
- Acheampong, A. O., Dzator, J., Dzator, M., & Salim, R. (2022). Unveiling the effect of transport infrastructure and technological innovation on economic growth, energy consumption and CO2 emissions. *Technological Forecasting and Social Change*, 182, 24, Article 121843. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121843>
- Adebayo, T. S., Ghosh, S., Nathaniel, S., & Wada, I. (2023). Technological innovations, renewable energy, globalization, financial development, and carbon emissions: role of inward remittances for top ten remittances receiving countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(26), 69330-69348. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-27184-x>
- 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.
- Ahmad, M., & Zheng, J. (2021). Do innovation in environmental-related technologies cyclically and asymmetrically affect environmental sustainability in BRICS nations?. *Technology in Society*, 67, 101746.
- Akan, T. (2023). Investigating renewable energy-climate change nexus by aggregate or sectoral renewable energy use?. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(1), 2042-2060. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22201-x>
- Al-Mulali, U., Ozturk, I., & Lean, H. H. (2015). The influence of economic growth, urbanization, trade openness, financial development, and renewable energy on pollution in Europe. *Natural Hazards*, 79(1), 621-644. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1865-9>
- Al-Mulali, U., Raboshuk, A., Ibrahim, R. L., & Saboori, B. (2024). Evaluating the asymmetric effect of patents driven environmental technologies on environmental degradation in the E7 countries: An extended model of STIRPAT. *Natural Resources Forum*, 22. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12439>
- Anwar, A., Sharif, A., Fatima, S., Ahmad, P., Sinha, A., Khan, S. A. R., & Jermisittiparsert, K. (2021). The asymmetric effect of public private partnership investment on transport CO2 emission in China: Evidence from quantile ARDL approach. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125282.
- Anwar, A., Siddique, M., Dogan, E., & Sharif, A. (2021). The moderating role of renewable and non-renewable energy in environment-income nexus for ASEAN countries: Evidence from Method of Moments Quantile Regression. *Renewable Energy*, 164, 956-967.

- Anwar, A., Sinha, A., Sharif, A., Siddique, M., Irshad, S., Anwar, W., & Malik, S. (2022). The nexus between urbanization, renewable energy consumption, financial development, and CO2 emissions: Evidence from selected Asian countries. *Environment, Development and Sustainability*, 1-21.
- Baltagi, B. H., Feng, Q., & Kao, C. (2012). A Lagrange Multiplier test for cross-sectional dependence in a fixed effects panel data model. *Journal of Econometrics*, 170(1), 164-177.
- Bayar, Y., Diaconu, L., & Maxim, A. (2020). Financial development and CO2 emissions in post-transition European Union countries. *Sustainability*, 12(7), 2640.
- Bouckaert, S., Pales, A. F., McGlade, C., Remme, U., Wanner, B., Varro, L., D'Ambrosio, D., & Spencer, T. (2021). Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector.
- Braun, E., & Wield, D. (1994). Regulation as a means for the social control of technology. *Technology Analysis & Strategic Management*, 6(3), 259-272.
- 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.
- Bulut, U. (2017). The impacts of non-renewable and renewable energy on CO2 emissions in Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 15416-15426.
- Chen, Y., & Lee, C.-C. (2020). Does technological innovation reduce CO2 emissions? Cross-country evidence. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121550.
- Chen, Z., Huang, W., & Zheng, X. (2019). The decline in energy intensity: does financial development matter?. *Energy Policy*, 134, 110945.
- Cheng, Y., Awan, U., Ahmad, S., & Tan, Z. (2021). How do technological innovation and fiscal decentralization affect the environment? A story of the fourth industrial revolution and sustainable growth. *Technological Forecasting and Social Change*, 162, 120398.
- Chudik, A., & Pesaran, M. H. (2015). Common correlated effects estimation of heterogeneous dynamic panel data models with weakly exogenous regressors. *Journal of Econometrics*, 188(2), 393-420. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2015.03.007>
- Dhaene, G., & Jochmans, K. (2015). Split-panel jackknife estimation of fixed-effect models. *The Review of Economic Studies*, 82(3), 991-1030.
- Doğan, M., Tekbaş, M., & GURSOY, S. (2022). The impact of wind and geothermal energy consumption on economic growth and financial development: evidence on selected countries. *Geothermal Energy*, 10(1), 19.
- Du, K., Li, P., & Yan, Z. (2019). Do green technology innovations contribute to carbon dioxide emission reduction? Empirical evidence from patent data. *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 297-303.
- Dumitrescu, E.-I., & Hurlin, C. (2012). Testing for Granger non-causality in heterogeneous panels. *Economic Modelling*, 29(4), 1450-1460.
- Ehigiamusoe, K. U., & Lean, H. H. (2019). Effects of energy consumption, economic growth, and financial development on carbon emissions: evidence from heterogeneous income groups. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(22), 22611-22624.

- EI. (2023). Energy Institute Statistical Review of World Energy 2023.
- Eluwole, K. K., Saint Akadiri, S., Alola, A. A., & Etokakpan, M. U. (2020). Does the interaction between growth determinants a drive for global environmental sustainability? Evidence from world top 10 pollutant emissions countries. *Science of the Total Environment*, 705, 135972.
- EPA. (2022). Overview of Greenhouse Gases. US EPA. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- Ergün, S., & Polat, M. A. (2022). *Finansal gelişme süreci ve çevresel kalite üzerine etkilerinin ampirik kanıtları*. In A. Şit & C. Telek (Eds.), *Ekonomi ve Finans Alanında Ampirik Çalışmalar* (Vol. 1, pp. 2-30). Ankara: Gazi Kitabevi.
- Fareed, Z. S., Rehman, M. A., Adebayo, T. S., Wang, Y. H., Ahmad, M., & Shahzad, F. (2022). Financial inclusion and the environmental deterioration in Eurozone: The moderating role of innovation activity. *Technology in Society*, 69, 13. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101961>
- Ganda, F. (2019). The impact of innovation and technology investments on carbon emissions in selected organisation for economic Co-operation and development countries. *Journal of Cleaner Production*, 217, 469-483.
- Guo, J., Zhou, Y., Ali, S., Shahzad, U., & Cui, L. (2021). Exploring the role of green innovation and investment in energy for environmental quality: An empirical appraisal from provincial data of China. *Journal of Environmental Management*, 292, 112779.
- Gyamfi, B. A., Agozie, D. Q., & Bekun, F. V. (2022). Can technological innovation, foreign direct investment and natural resources ease some burden for the BRICS economies within current industrial era?. *Technology in Society*, 70, 102037.
- Habiba, U., Xinbang, C., & Ahmad, R. I. (2021). The influence of stock market and financial institution development on carbon emissions with the importance of renewable energy consumption and foreign direct investment in G20 countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 67677-67688.
- Habiba, U., Xinbang, C., & Anwar, A. (2022). Do green technology innovations, financial development, and renewable energy use help to curb carbon emissions?. *Renewable Energy*, 193, 1082-1093.
- Hashmi, R., & Alam, K. (2019). Dynamic relationship among environmental regulation, innovation, CO2 emissions, population, and economic growth in OECD countries: A panel investigation. *Journal of Cleaner Production*, 231, 1100-1109.
- Hasni, R., Dridi, D., & Ben Jebli, M. (2023). Do financial development, financial stability and renewable energy disturb carbon emissions? Evidence from asia-pacific economic cooperation economics. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(35), 83198-83213. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-28418-8>
- Hayat, F., Pirzada, M. D. S., & Khan, A. A. (2018). The validation of Granger causality through formulation and use of finance-growth-energy indexes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1859-1867.
- IEA. (2015). Renewables 2015: Global Status Report. <https://www.iea.org/reports/renewables-2015-global-status-report>

- IEA. (2017). Renewables 2017: Analysis and Forecasts to 2022. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/952fe0c1-8d57-4dcc-adbd-85c854674478/MRSrenew2017.pdf>
- IEA. (2020). International Energy Agency (IEA) Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025. <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>
- IPCC. (2014). Climate Change 2014. Synthesis Report. Summary for Policymakers. C. U. Press.
- Jianguo, D., Ali, K., Alnor, F., & Ullah, S. (2022). The nexus of financial development, technological innovation, institutional quality, and environmental quality: evidence from OECD economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(38), 58179-58200.
- Jin, T., & Kim, J. (2018). What is better for mitigating carbon emissions—Renewable energy or nuclear energy? A panel data analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 464-471.
- Kartal, M. T., Pata, U. K., & Alola, A. A. (2024). Renewable electricity generation and carbon emissions in leading European countries: Daily-based disaggregate evidence by nonlinear approaches. *Energy Strategy Reviews*, 51, 20. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101300>
- Ke, H., Yang, W., Liu, X., & Fan, F. (2020). Does innovation efficiency suppress the ecological footprint? Empirical evidence from 280 Chinese cities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 6826.
- Kevser, M., Tekbaş, M., Doğan, M., & Koşluoğlu, S. (2022). Nexus among biomass energy consumption, economic growth, and financial development: Evidence from selected 15 countries. *Energy Reports*, 8, 8372-8380.
- Khan, S. A. R., Ponce, P., & Yu, Z. (2021). Technological innovation and environmental taxes toward a carbon-free economy: An empirical study in the context of COP-21. *Journal of Environmental Management*, 298, 113418.
- Khezri, M., Heshmati, A., & Khodaei, M. (2022). Environmental implications of economic complexity and its role in determining how renewable energies affect CO2 emissions. *Applied Energy*, 306, 117948.
- Kirikaleli, D., Güngör, H., & Adebayo, T. S. (2022). Consumption-based carbon emissions, renewable energy consumption, financial development and economic growth in Chile. *Business Strategy and the Environment*, 31(3), 1123-1137.
- Le, T.-H., Le, H.-C., & Taghizadeh-Hesary, F. (2020). Does financial inclusion impact CO2 emissions? Evidence from Asia. *Finance Research Letters*, 34, 101451.
- Liu, X., Zhang, K., Tu, H., Liu, C., & Sun, Y. (2022). Dynamic Effects of CO2 Emissions on Anticipated Financial Development of European Countries. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 882847.
- Ma, Q., Murshed, M., & Khan, Z. (2021). The nexuses between energy investments, technological innovations, emission taxes, and carbon emissions in China. *Energy Policy*, 155, 112345.
- Majeed, M. T., & Mazhar, M. (2019). Financial development and ecological footprint: a global panel data analysis. *Pakistan Journal of Commerce and Social Sciences (PJCSS)*, 13(2), 487-514.

- Maji, I. K., Habibullah, M. S., & Saari, M. Y. (2017). Financial development and sectoral CO₂ emissions in Malaysia. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 7160-7176.
- Nica, E., Poliakova, A., Popescu, G. H., Valaskova, K., Burcea, S. G., & Constantin, A. L. D. (2023). The impact of financial development, health expenditure, CO₂ emissions, institutional quality, and energy Mix on life expectancy in Eastern Europe: CS-ARDL and quantile regression Approaches. *Heliyon*, *9*(11), 16. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21084>
- Omri, A., Daly, S., Rault, C., & Chaibi, A. (2015). Financial development, environmental quality, trade and economic growth: What causes what in MENA countries. *Energy Economics*, *48*, 242-252.
- Paramati, S. R., Mo, D., & Huang, R. (2021). The role of financial deepening and green technology on carbon emissions: Evidence from major OECD economies. *Finance Research Letters*, *41*, 101794.
- Park, Y., Meng, F. C., & Baloch, M. A. (2018). The effect of ICT, financial development, growth, and trade openness on CO₂ emissions: an empirical analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(30), 30708-30719. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3108-6>
- Pata, U. K. (2018). Renewable Energy Consumption, Urbanization, Financial Development, Income and CO₂ Emissions In Turkey: Testing Ekc Hypothesis with Structural Breaks. *Journal of Cleaner Production*, *187*, 770-779.
- Pejovic, B., Karadzic, V., Dragasevic, Z., & Backovic, T. (2021). Economic growth, energy consumption and CO₂ emissions in the countries of the European Union and the Western Balkans. *Energy Reports*, *7*, 2775-2783. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.05.011>
- Pesaran, M. H. (2004). General diagnostic tests for cross section dependence in panels. Cambridge Working Papers. *Economics*, *1240*(1), 1.
- Pesaran, M. H. (2007a). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of Applied Econometrics*, *22*(2), 265-312. <https://doi.org/10.1002/jae.951>
- Pesaran, M. H. (2007b). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of Applied Econometrics*, *22*(2), 265-312.
- Pesaran, M. H., Ullah, A., & Yamagata, T. (2008). A bias-adjusted LM test of error cross-section independence. *The econometrics journal*, *11*(1), 105-127.
- Pesaran, M. H., & Yamagata, T. (2008). Testing slope homogeneity in large panels. *Journal of Econometrics*, *142*(1), 50-93. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2007.05.010>
- Shahbaz, M., Haouas, I., Sohag, K., & Ozturk, I. (2020). The financial development-environmental degradation nexus in the United Arab Emirates: the importance of growth, globalization and structural breaks. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, 10685-10699.
- Shahbaz, M., Nasir, M. A., & Roubaud, D. (2018). Environmental degradation in France: the effects of FDI, financial development, and energy innovations. *Energy Economics*, *74*, 843-857.

- Shahbaz, M., Shahzad, S. J. H., Ahmad, N., & Alam, S. (2016). Financial development and environmental quality: the way forward. *Energy Policy*, 98, 353-364.
- Shan, S., Genç, S. Y., Kamran, H. W., & Dinca, G. (2021). Role of green technology innovation and renewable energy in carbon neutrality: A sustainable investigation from Turkey. *Journal of Environmental Management*, 294, 113004.
- Sharma, G. D., Tiwari, A. K., Erkut, B., & Mundi, H. S. (2021). Exploring the nexus between non-renewable and renewable energy consumptions and economic development: Evidence from panel estimations. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 146, 17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111152>
- Shen, Y., Su, Z.-W., Malik, M. Y., Umar, M., Khan, Z., & Khan, M. (2021). Does green investment, financial development and natural resources rent limit carbon emissions? A provincial panel analysis of China. *Science of the Total Environment*, 755, 142538.
- Sheraz, M., Xu, D. Y., Ahmed, J., Ullah, S., & Ullah, A. (2021). Moderating the effect of globalization on financial development, energy consumption, human capital, and carbon emissions: evidence from G20 countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(26), 35126-35144. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13116-0>
- Su, C.-W., Pang, L.-D., Tao, R., Shao, X., & Umar, M. (2022). Renewable energy and technological innovation: Which one is the winner in promoting net-zero emissions?. *Technological Forecasting and Social Change*, 182, 121798.
- Tekbaş, M., & Yıldırım, M. (2023). Gelişmekte Olan Ülkelerde İnovasyon ve Ekonomik Büyümenin CO2 Emisyonu Üzerine Etkisi. *JOEEP: Journal of Emerging Economies and Policy*, 8(2), 507-516.
- Ullah, A., Dogan, M., Pervaiz, A., Bukhari, A. A. A., Akkus, H. T., & Dogan, H. (2024). The impact of digitalization, technological and financial innovation on environmental quality in OECD countries: Investigation of N-shaped EKC hypothesis. *Technology in Society*, 77, 102484.
- Usman, M., & Makhdam, M. S. A. (2021). What abates ecological footprint in BRICS-T region? Exploring the influence of renewable energy, non-renewable energy, agriculture, forest area and financial development. *Renewable Energy*, 179, 12-28.
- Wang, K. H., Liu, L., Adebayo, T. S., Lobont, O. R., & Claudia, M. N. (2021). Fiscal decentralization, political stability and resources curse hypothesis: A case of fiscal decentralized economies. *Resources Policy*, 72, 8. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102071>
- Wang, Q., Wang, L., & Li, R. (2023). Trade protectionism jeopardizes carbon neutrality—decoupling and breakpoints roles of trade openness. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 201-215.
- WDI. (2023). *World Development Indicators* (<https://datatopics.worldbank.org/world-development-indicators/>)
- Westerlund, J. (2007). Testing for error correction in panel data. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 69(6), 709-748. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.2007.00477.x>

- Xu, X., Dai, W., Muhammad, T., & Zhang, T. (2023). The Dynamic Relationship between Carbon Emissions, Financial Development, and Renewable Energy: A Study of the N-5 Asian Countries. *Sustainability*, *15*(18), 13888.
- Zhang, B., Zhang, T., Yu, S., Wang, H., Wang, X., Chang, Y., Mou, H., Zhang, P., Wang, L., & Jiang, Y. (2017). Carbon-wrapped four-component Na–Ni–Ti–Co oxides via sol–gel process for NIB anode material with superior cycling stability. *Journal of Applied Electrochemistry*, *47*, 855-864.
- Zhang, Y. Y., Li, Y., & Wei, Y. G. (2023). Understanding the relation between the socio-economic development and CO2 emission of 76 contracting countries in The Paris Agreement. *Environment Development and Sustainability*, *25*(12), 14131-14153. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02653-4>
- Zhen, Z., Ullah, S., Shaowen, Z., & Irfan, M. (2023). How do renewable energy consumption, financial development, and technical efficiency change cause ecological sustainability in European Union countries?. *Energy & Environment*, *34*(7), 2478-2496. <https://doi.org/10.1177/0958305x221109949>