

Yenilenebilir enerji ve fosil yakıtların karbon emisyonlarına etkisi: En çok yenilenebilir enerji tüketen 10 ülke üzerine CS-ARDL analizi

The impact of renewable energy and fossil fuels on carbon emissions: A CS-ARDL analysis of the top 10 renewable energy-consuming countries

Yasin Büyükkör¹ 

Öz

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman, Türkiye, yasinbuyukkor@kmu.edu.tr

ORCID: 0000-0002-1006-0539

Küresel ölçekte artan fosil yakıt tüketimi, iklim değişikliği ve çevresel bozulmaların başlıca nedenlerinden biridir. Bu çerçevede, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, sürdürülebilir kalkınma politikalarının temel bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışma, 1990-2021 dönemi için yenilenebilir enerjiyi en çok tüketen 10 ülke örneklemine, karbon dioksit (CO₂) emisyonlarının temel belirleyicilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada bağımlı değişken olarak CO₂ emisyonları kullanılmış; ekonomik büyüme (GDP), yenilenebilir enerji tüketimi (RE), fosil yakıt tüketimi (FOS), sabit sermaye yatırımları (GFC) ve nüfus artış oranı (POPGR) bağımsız değişkenler olarak modele dâhil edilmiştir. Panel veri setiyle yürütülen analizde öncelikle yatay kesit bağımlılığı, durağanlık ve eğim homojenliği testleri uygulanmıştır. Değişkenler arasındaki uzun dönem ilişkiler Westerlund eşbütünleşme testi ile sınanmış; kısa ve uzun dönemli etkiler Cross-Sectionally Augmented Autoregressive Distributed Lag (CS-ARDL) modeliyle tahmin edilmiştir. Bulgular, fosil yakıtların CO₂ emisyonlarını artırdığını, yenilenebilir enerjinin ise emisyonları azalttığını göstermektedir. Ayrıca ekonomik büyüme ve nüfus artışı emisyonlar üzerinde pozitif yönde, sabit sermaye yatırımlarının uzun dönemde negatif etkisi olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, enerji dönüşümünün hızlandırılmasının ve yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılmasının çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Karbon Emisyonları, Yenilenebilir Enerji, Fosil Yakıt Tüketimi, Sürdürülebilir Büyüme, CS-ARDL Modeli

Jel Kodları: C33, Q42, Q54

Abstract

The growing use of fossil fuels worldwide is a major driver of climate change and environmental degradation. In this context, expanding renewable energy sources is regarded as a key element of sustainable development policies. This study investigates the determinants of carbon dioxide (CO₂) emissions in the top 10 renewable energy-consuming countries over the period 1990-2021. CO₂ emissions are the dependent variable, while economic growth (GDP), renewable energy use (RE), fossil fuel consumption (FOS), gross fixed capital formation (GFC), and population growth (POPGR) are employed as independent variables. Panel data analysis is conducted by applying cross-sectional dependence tests, unit root tests, and slope homogeneity tests. Long-run relationships are examined with the Westerlund cointegration test, and both short- and long-run effects are estimated through the Cross-Sectionally Augmented Autoregressive Distributed Lag (CS-ARDL) model. Results show that fossil fuels raise CO₂ emissions, while renewable energy mitigates them. Moreover, GDP and population growth have positive effects, whereas capital formation reduces emissions in the long run. The findings underscore the importance of accelerating energy transition and supporting renewable investments to achieve environmental sustainability.

Keywords: Emissions, Renewable Energy, Fossil Fuel Consumption, Sustainable Growth, CS-ARDL Model

Jel Codes: C33, Q42, Q54

Atıf/Citation: Büyükkör, Y. Yenilenebilir enerji ve fosil yakıtların karbon emisyonlarına etkisi: En çok yenilenebilir enerji tüketen 10 ülke üzerine CS-ARDL analizi, bmij (2025) 13 (4): 2019-2036 doi: <https://doi.org/10.15295/bmij.v13i4.2664>

Extended Abstract

The impact of renewable energy and fossil fuels on carbon emissions: A CS-ARDL analysis of the top 10 renewable energy-consuming countries

Literature

Recent empirical studies widely examine the determinants of CO₂ emissions, with particular attention to energy consumption patterns. Findings consistently reveal that renewable energy reduces emissions, while fossil fuel consumption amplifies them (Abbas et al., 2020; Shao et al., 2021; Kuo et al., 2022; Ali & Seraj, 2022; Mehmood, 2022a). A growing body of research, especially since 2020, has applied the CS-ARDL framework to validate these dynamics across diverse country groups (Hao et al., 2021; Shen et al., 2021; Abbasi et al., 2022; Sharif et al., 2023; Deka et al., 2023). Beyond energy variables, structural and technological factors—including energy efficiency, green innovation, environmental regulation, digital technologies, and trade structures—have been shown to exert significant influence on emissions (Ibrahim et al., 2022; Adebayo et al., 2023; Wang & Zhang, 2023; Wu et al., 2023). Notably, environmental taxation, fintech, and information and communication technologies emerge as tools that foster emission reduction, while trade and financial inclusion shape the renewable energy–emissions nexus (Li et al., 2022b; Cai & Wei, 2023).

In parallel with energy and structural factors, recent contributions have highlighted the role of socio-demographic and institutional variables in shaping environmental quality. Positive impacts are reported for female employment, education spending, human capital, and governance quality (Mehmood, 2022b; Wang et al., 2023; Yin & Qamruzzaman, 2024). Conversely, rapid urbanisation, industrialisation, and energy-intensive growth often increase CO₂ emissions (Azam et al., 2022; Voumik et al., 2023; Li et al., 2023). Fiscal and policy instruments, such as environmental taxes, regulatory strictness, and public-private investments, also demonstrate effectiveness in reducing emissions (Li et al., 2023; Yin & Qamruzzaman, 2024). Furthermore, causal analyses reveal complex bidirectional linkages between GDP, renewable energy, and CO₂ emissions (Ibrahim et al., 2022; Öztürk et al., 2023). Overall, the literature underscores that reducing fossil dependence, expanding renewable energy, and reinforcing financial, institutional, and social structures are essential for long-term environmental sustainability.

Research subject

This study investigates the impact of renewable energy and fossil fuel consumption on CO₂ emissions in the top 10 countries by renewable energy consumption for the period 1990–2021.

Research purpose and importance

The main purpose is to identify the key economic, demographic, and energy-related determinants of CO₂ emissions, contributing to the debate on sustainable energy policies and climate change mitigation.

Contribution of the article to the literature

The study extends prior research by focusing on countries with the highest levels of renewable energy use and by applying the CS-ARDL method, which simultaneously accounts for cross-sectional dependence and slope heterogeneity.

Design and method

A panel dataset covering 1990–2021 was analysed. Econometric procedures included cross-sectional dependence, unit root testing, slope homogeneity, Westerlund cointegration, and CS-ARDL estimation.

Research type

Quantitative, empirical, and explanatory research based on panel econometrics.

Research problems

What are the short- and long-term effects of renewable energy, fossil fuel use, economic growth, gross fixed capital formation, and population growth on CO₂ emissions?

Data collection method

Secondary data obtained from the World Bank (World Development Indicators).

Quantitative/qualitative analysis

Quantitative analysis through panel econometric methods.

Research model

CO₂ emissions as the dependent variable; GDP, renewable energy consumption, fossil fuel consumption, gross fixed capital formation, and population growth as independent variables.

Research hypotheses

H₁: Renewable energy consumption reduces CO₂ emissions.

H₂: Fossil fuel consumption increases CO₂ emissions.

H₃: Economic growth increases CO₂ emissions.

H₄: Population growth increases CO₂ emissions.

H₅: Gross fixed capital formation reduces CO₂ emissions.

Findings and discussion

The findings indicate that fossil fuels significantly increase emissions, whereas renewable energy reduces them in both the short- and long-term. GDP and population growth increase emissions, while capital formation reduces them in the long run.

Findings as a result of the analysis

Results confirm long-run cointegration among the variables, with the ECM term validating the equilibrium adjustment.

Hypothesis test results

All main hypotheses were supported, consistent with theoretical expectations, except that gross fixed capital formation showed a long-term negative effect rather than a positive one.

Discussing the findings with the literature

The results align with previous studies reporting renewable energy's mitigating role and fossil fuels' aggravating impact on emissions (e.g., Abbas et al., 2020; Shao et al., 2021; Abbasi et al., 2022).

Conclusion, recommendation and limitations

The study concludes that accelerating the energy transition and investing in renewable technologies are crucial. Limitations include a restricted country selection to the top 10 renewable energy consumers and reliance on World Bank data.

Results of the article

Empirical evidence demonstrates that renewable energy consumption curbs CO₂ emissions, while fossil fuels, GDP, and population growth raise them, with mixed effects of capital formation.

Suggestions based on results

Policymakers should expand renewable energy investments, reduce reliance on fossil fuels, and direct capital formation toward green technologies.

Limitations of the article

A restricted dataset (1990–2021) and a focus on only 10 countries limit generalizability. Future research may expand the scope and apply alternative econometric approaches.

Results of the article

The empirical results reveal that fossil fuel consumption significantly increases CO₂ emissions in both the short- and long-run, whereas renewable energy consumption has a statistically significant mitigating effect. Economic growth and population growth are found to be major drivers of rising emissions, confirming the environmental costs of rapid economic and demographic expansion. Interestingly, gross fixed capital formation exerts a negative effect on emissions in the long term, suggesting that investments in advanced technologies and infrastructure contribute to environmental sustainability. The error correction term indicates a strong and rapid adjustment towards equilibrium, validating the robustness of the CS-ARDL model. Overall, the study provides solid evidence that energy structure and socio-economic factors jointly shape carbon emissions across high-renewable-energy-consuming countries.

Suggestions based on results

Based on the findings, policymakers are advised to prioritise renewable energy investments and implement incentives that accelerate the transition away from fossil fuels. Governments should encourage capital formation in green technologies, energy efficiency, and sustainable infrastructure to enhance long-term environmental quality. Measures to manage the environmental impact of economic and population growth are also critical, such as carbon taxation, urban planning reforms, and stronger institutional frameworks. Furthermore, international cooperation and technology transfer could facilitate cleaner energy production and mitigate global climate risks. These policy implications highlight the importance of adopting holistic strategies that balance growth with sustainability.

Limitations of the article

This study is subject to several limitations. First, the dataset covers only the top 10 renewable energy-consuming countries, which restricts the generalizability of the findings to other economies. Second, the analysis relies solely on World Bank data, which may omit important country-specific factors or more recent energy indicators. Third, while the CS-ARDL approach accounts for cross-sectional dependence and heterogeneity, other advanced econometric models, such as NARDL or frequency-domain methods, may reveal additional dynamics. Finally, the study does not account for potential structural breaks arising from global crises, policy changes, or technological shocks. Future research can address these limitations by expanding the sample, incorporating new datasets, and applying alternative methodological frameworks.

Giriş

Günümüzde hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeler, ekonomik büyüme ve uzun vadeli kalkınmayı temel hedefleri arasında konumlandırmaktadır. Ancak bu hedeflere ulaşma sürecinde sanayileşme, üretim, tüketim ve doğal kaynak kullanımına dayalı politikalar, önemli çevresel tahribatlara yol açmıştır. Sera gazları (greenhouse gases-GHG), dünyanın iklimi üzerinde büyük zarara yol açmakta; iklim değişikliği ve çevresel bozulmaya neden olmaktadır (Asongu vd., 2020). Bu çevresel bozulmalar hava ve su kirliliği, ozon tabakasının incilmesi ve kimyasal artıkların deniz suları kirletmesi gibi durumlara yol açmaktadır (Ali, Yusop, Kaliappan ve Chin., 2021). Özellikle enerji üretimi için önemli bir yeri olan fosil yakıtların kullanılması yangın, sel ve fırtına gibi ekstrem hava koşullarına neden olmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO)'nın (2023) raporuna göre yaklaşık 3,6 milyar insan iklim değişikliğinin hassas bir şekilde etkilediği bölgelerde yaşamakta olduğunu ve 2030 ile 2050 yılları arasında iklim değişikliğinin yetersiz beslenme, sıtma, ishal ve ısı stresi nedeniyle 250.000 ek ölüme yol açacağı beklenmektedir. Ayrıca sağlık üzerindeki etkilerinin 2030 yılına kadar 2-4 milyar dolar olacağı tahmin edilmektedir (WHO, 2023).

Taşımacılık ve elektrik üretimi gibi kritik sektörlerde enerji talebi büyük ölçüde fosil yakıtlar aracılığıyla karşılanmaktadır. Bu durum, başta karbon dioksit (CO_2) olmak üzere sera gazı emisyonlarını artırarak çevresel sorunları derinleştirmektedir. Artan çevresel baskılar ve iklim değişikliği riskleri karşısında, birçok ülke enerji güvenliğini sağlamak ve sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek amacıyla rüzgâr, biyokütle, güneş ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir. Bu yönelim sürdürülebilir büyümeye yardımcı olurken CO_2 emisyonlarını azaltmaktadır (Ito, 2017). Ekonomik büyümenin sürdürülebilirliği, yalnızca yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretiminde etkin biçimde kullanılmasıyla değil, aynı zamanda doğal sermaye stoklarının korunmasını sağlayacak şekilde çevresel bozulmaların sürekli ve sistematik olarak izlenmesiyle mümkündür (Schmalensee, 2012).

Çevresel sorunların çözümüne yönelik olarak, sanayileşmiş ve gelişmekte olan ülkeler, uluslararası kuruluşlar ve özel sektör paydaşları arasında çeşitli uluslararası anlaşmalar imzalanmıştır. Bu kapsamda, 1997 yılında Kyoto Protokolü ve 2015 yılında Paris İklim Anlaşması (PCA) hayata geçirilmiştir. Bu anlaşmaların temel hedefi, küresel sıcaklık artışını $1,5^\circ C$ ile sınırlamak, CO_2 emisyonlarını azaltmak ve fosil yakıt temelli enerji kullanımını düşürmektir. Ancak iklim değişikliğiyle etkili mücadele edebilmek ve karbon salımlarını minimize edebilmek için, fosil yakıt temelli enerji üretiminin yerini yenilenebilir enerji kaynaklarına bırakması kritik önem taşımaktadır. Uzun vadede, temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları çevresel tahribatın önlenmesinde ve iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılmasında önemli bir rol oynayabilir. Bu doğrultuda, karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik üç temel strateji öne çıkmaktadır: fosil yakıt tüketiminin azaltılması, enerji tüketim yapısının yenilenebilir kaynaklar lehine dönüştürülmesi ve enerji verimliliğinin artırılması. Özellikle ikinci ve üçüncü stratejiler hem karbon emisyonlarını azaltma hem de enerji arz güvenliğini sağlama açısından sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Nitekim birçok gelişmekte olan ülkede elektrik üretiminde kömür tüketimi başlıca karbon salımı kaynağıdır. Bu nedenle, kömürle çalışan termik santraller yerine hidroelektrik, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji teknolojilerinin yaygınlaştırılması büyük önem arz etmektedir (Su, Umar ve Khan, 2021; Ibrahim, Ajide, Usman ve Kousar, 2022; Pan, Adebayo, Ibrahim ve Al-Faryan, 2023).

Geçmiş çalışmalar dikkate alındığında CO_2 emisyonunun modellenmesinde birçok değişken kullanılmıştır. Bu değişkenler ekonomik yapı, enerji yapısı ve sosyal yapı çevresinde şekillenmektedir. Ekonomik yapı belirleyicilerini genel olarak ekonomik büyümeyi gayri safi yurtiçi hasıla (GDP), doğrudan yabancı yatırımlar (FDI) ve sabit sermaye yatırımları (GFC) oluştururken, enerji yapısını yenilenebilir enerji (RE) ve fosil yakıt tabanlı (FOS) enerji kaynakları oluşturmaktadır. Sosyal yapı içerisinde ise nüfus, nüfus büyümesi (POPGR), insan sermayesi (HCI) ve hükümetin etkinliği gibi değişkenler yer almaktadır. Bu bağlamda bu çalışmada, yenilenebilir enerji kullanımında ön plana çıkan ülkelerden oluşan bir örneklem kullanılmıştır. Analize dâhil edilen ülke grubu, 2023 yılı itibarıyla en yüksek yenilenebilir enerji kullanan ilk 10 ülkeden oluşmaktadır. Bu ülke grubunun seçilmesi, literatürde görece az incelenen yüksek yenilenebilir enerji yoğunluğuna sahip ekonomilerin karbon emisyon dinamiklerini ortaya koyması bakımından çalışmaya özgün bir katkı kazandırmaktadır. Ayrıca, çalışmada kullanılan Cross-Sectionally Augmented Autoregressive Distributed Lag (CS-ARDL) modeli, yatay kesit bağımlılığı ve eğim heterojenliğini eşzamanlı olarak dikkate alan gelişmiş bir yöntem olup, geleneksel panel ARDL analizlerine kıyasla daha tutarlı ve güvenilir tahminler elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu yönüyle çalışma hem örneklem seçimi hem de kullanılan yöntem açısından literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmakta ve yenilenebilir ile fosil enerji tüketiminin CO_2 emisyonları üzerindeki kısa ve uzun dönem etkilerini karşılaştırmalı biçimde inceleyerek sürdürülebilir enerji politikaları literatürüne özgün ampirik bulgular kazandırmaktadır. Panel veri seti 1996-2021

dönemini kapsamaktadır. Ampirik analiz sürecinde öncelikle değişkenlerin yatay kesit bağımlılığı incelenmiş; ardından durağanlık düzeyleri test edilmiştir. Değişkenler arası yapısal farklılıkların kontrolü amacıyla eğitim homojenliği testi uygulanmış, uzun dönem ilişkilerin varlığı Westerlund (2007) eşbütünleşme testi ile araştırılmıştır. Son olarak, değişkenler arasındaki kısa ve uzun dönemli ilişkiler Cross-Sectionally Augmented Autoregressive Distributed Lag (CS-ARDL) modeli aracılığıyla tahmin edilmiştir. Bu dönem aralığı, çalışmada kullanılan tüm değişkenlerin Dünya Bankası veri tabanında eksiksiz biçimde mevcut olduğu en geniş ortak dönemi temsil etmektedir. Daha önceki yıllarda bazı göstergelere ait veri eksiklikleri bulunduğundan, analiz dönemi veri bütünlüğü korunacak şekilde 1996 yılında başlatılmıştır.

Bu çalışmanın yapısı şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölüm, konuyla ilgili mevcut literatürü inceleyerek önceki araştırmalara genel bir bakış sunmaktadır. Üçüncü bölümde, çalışmada kullanılan veri seti, kurulan ekonometrik modeller ve teorik çerçeve ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Dördüncü bölüm, elde edilen ampirik bulguları ve bunlara ilişkin yorumları içermektedir. Beşinci ve son bölümde ise çalışmanın genel sonuçları özetlenmekte, bulgular politika yapıcılar açısından tartışılmakta ve gelecekteki araştırmalar için öneriler sunulmaktadır.

Literatür taraması

Bu çalışmada yer verilen literatür, CO₂ emisyonunu bağımlı değişken olarak ele alan ampirik araştırmalardan oluşmaktadır. Literatür taramasında, özellikle fosil yakıt tüketimi ve yenilenebilir enerji kullanımı gibi çevresel belirleyicilerin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini inceleyen panel veri çalışmaları dikkate alınmıştır. Bu bağlamda, son dönemde giderek artan sayıda araştırmada CS-ARDL yönteminin tercih edildiği ve bu yöntemin özellikle 2020 yılı itibarıyla literatürde daha yaygın şekilde kullanılmaya başlandığı gözlemlenmektedir. İzleyen paragraflarda çalışmalar içeriklerine göre ve benzer kullanılan değişkenlere göre bir araya getirilmiştir.

Yenilenebilir ve fosil kaynaklı enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi, özellikle son yıllarda farklı ülke gruplarını kapsayan çok sayıda panel veri çalışmasında incelenmiştir. Genel olarak, yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını azaltıcı, fosil yakıt tüketiminin ise artırıcı etkide bulunduğu yönünde tutarlı bulgular elde edilmiştir (Abbas, Nurunnabi, Alfakhri, Khan, Hussain ve Iqbal, 2020; Shao, Zhong, Liu ve Li, 2021; Kuo, Lin ve Ho, 2022; Ali ve Seraj, 2022; Mehmood, 2022a). Bu bulgular hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerden oluşan örneklemeler üzerinde, yaygın olarak CS-ARDL yöntemi kullanılarak doğrulanmıştır (Hao, Umar, Khan ve Ali, 2021; Shen, Su, Malik, Umar, Khan ve Khan, 2021; Abbasi, Shahbaz, Zhang, Irfan ve Alvarado, 2022; Sharif, Kartal, Bekun, Pata, Foon ve Depren, 2023; Deka, Yakubi Bako, Özdeşer ve Seraj, 2023). Ayrıca, Türk literatüründe de yenilenebilir enerjinin karbon emisyonları üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalar artmaktadır. Örneğin Akın (2025), çevresel performans endeksinde başarılı olan 10 ülke örneğinde yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını azalttığını ortaya koymuştur. Benzer şekilde, enerji verimliliği, yeşil inovasyon, çevre teknolojileri, çevresel vergiler, dış ticaret yapısı, finansal gelişme ve bilgi iletişim teknolojileri gibi yapısal değişkenlerin de CO₂ emisyonları üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir (İbrahim vd., 2022; Meng, Wu, Hang ve Duan, 2022; Adebayo, Ullah, Kartal, Ali, Pata ve Ağa, 2023; Wang ve Zhang, 2023; Tang, Shahla, Aliyeva ve Huseynov, 2023; Wu, Adebayo, Yue ve Umut, 2023). Örneğin, bazı çalışmalarda fintech, çevresel düzenlemeler ve bilgi teknolojileri CO₂ emisyonlarını azaltıcı yönde etkili bulunmuştur (Adebayo vd., 2023); ticaretin ve finansal kapsayıcılığın ise yenilenebilir enerji ve CO₂ ilişkisini şekillendirdiği gösterilmiştir (Li, Alharthi, Ahmad, Hanif ve Hassan, 2022b; Cai ve Wei, 2023). Ayrıca, CO₂ emisyonlarının sağlık üzerindeki etkileri (Sohail, Du ve Abbasi, 2023), kurumsal kalite gibi düzenleyici faktörlerin yenilenebilir enerji tüketimini yönlendirdiği (Tang vd., 2023) ve bazı durumlarda wavelet analizlerle bu ilişkilerin frekans-temelli boyutlarının da incelendiği görülmüştür (Wu vd., 2023). Bazı çalışmalarda çevresel Kuznets eğrisi hipotezi doğrulanırken (Mehmood, Agyekum, Uhumamure, Shale ve Mariam, 2022), bazı örneklerde geçerliliğini yitirdiği gözlemlenmiştir (Vo, Ho, Le ve Vo, 2022).

Sosyal, demografik ve yapısal faktörlerin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi de giderek artan bir şekilde araştırılmaktadır. Özellikle kadın istihdamı, eğitim harcamaları, yaşlanan nüfus ve insan sermayesi gibi göstergelerin çevresel kaliteyi olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir (Mehmood, 2022b; Mehmood vd., 2022; Wang, Rehman, Fahad ve Linzhao, 2023). Ekonomik özgürlük, kurumsal kalite, kamu yatırımları ve yönetimsel faktörlerin de bazı çalışmalarda emisyonları azaltıcı bir unsur olarak öne çıktığı görülmektedir (Li vd., 2022a; Tang vd., 2023; Yin ve Qamruzzaman, 2024). Buna karşılık kentleşme, sanayileşme, enerji yoğun büyüme, kamu harcamaları, küreselleşme, finansal kapsayıcılık ve nüfus artışı gibi değişkenlerin CO₂ emisyonlarını artırıcı etkileri sıklıkla rapor edilmiştir (Azam, Uddin, Khan ve Tariq, 2022; Voumik, Mimi ve Raihan, 2023; Li vd., 2023; Cai ve Wei, 2023). Ayrıca, bazı araştırmalarda vergi gelirleri, çevresel politika sıklığı ve kamu-özel yatırımlar gibi maliye ve altyapı

politikası araçlarının CO₂ emisyonlarını azaltmada etkili olduğu da tespit edilmiştir (Li vd., 2023; Yin ve Qamruzzaman, 2024). Nedensellik ilişkileri bağlamında, bazı araştırmalar GSYH ile CO₂ emisyonları veya yenilenebilir enerji arasında tek ya da çift yönlü nedensellik olduğunu ortaya koymuştur (İbrahim vd., 2022; Öztürk, Han ve Özsolak, 2023). Sonuç olarak, literatürdeki bulgular büyük ölçüde örtüşmekte; yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması, fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması, finansal ve kurumsal yapının güçlendirilmesi ve sosyal göstergelerle desteklenen bütüncül politika yaklaşımlarının çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik rol oynadığı yönünde güçlü ampirik kanıtlar sunmaktadır. Bununla birlikte, mevcut çalışmayı önceki araştırmalardan ayıran temel özellik, yalnızca yenilenebilir enerji yoğunluğu yüksek ülkelerden oluşan özgün bir örneklem kullanması ve CO₂ emisyonlarını bu bağlamda karşılaştırmalı olarak analiz etmesidir. Ayrıca, çalışmada kullanılan CS-ARDL modeli, yatay kesit bağımlılığı ve heterojenliği eşzamanlı dikkate alarak önceki panel modellerden metodolojik olarak ayrılmaktadır.

Literatürde bu çalışmanın içeriğine uygun olan diğer çalışmalar Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1: CO₂ Emisyonları ile ilgili Diğer Çalışmalar

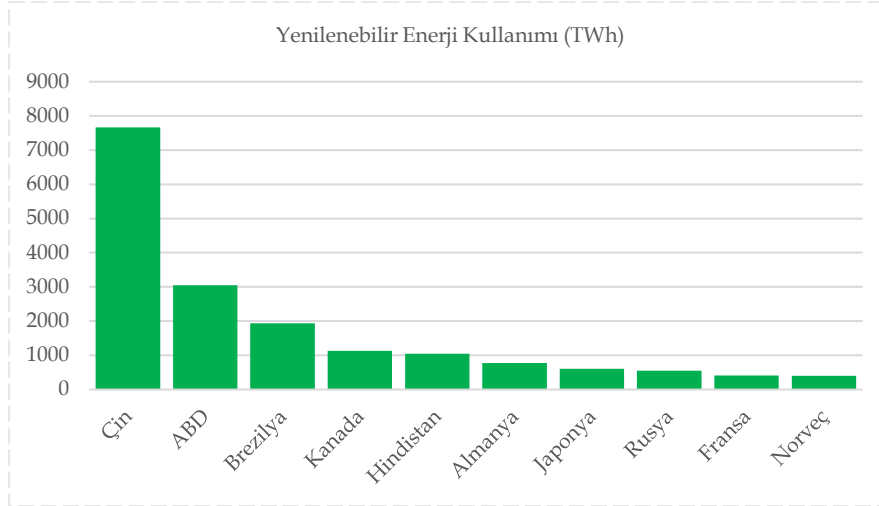
Yazar	Değişkenler	Sonuç
Sadiq, Chau, Ha, Phan, Ngo ve Huy, (2024a)	CO ₂ , RE, CORRUPT, EPU, GDP	Uzun Vadede: RE(-)
Sadiq, Hassan, Khan ve Rahman, (2024b)	CO ₂ , GF, GI, REPROD, RECONS, CTAX, IND	Uzun Vadede: GI(-), IND(+), RE(-)
Çobanoğulları (2024)	CO ₂ , GDPPC, HEXP, POP	Uzun Vadede: EX(+), GDP(+), GDPPC(+), POP(+)
Ebaidalla (2024)	RE, TAX, GI, TO, CO ₂ , GDP	Uzun Vadede: GI(+), RE(-), TO(+)
Eid, Mrabet ve Alsamara, (2024)	EE, CE, RERD, FFRD	Uzun Vadede: EE(+), RE(+)
Feng, Morake, Sampene ve Agyeman, (2024)	CO ₂ , EC, HC, TO, NR, URB, GDP	Uzun Vadede: EC(+), HC(-), NR(+), TO(+), URB(-)
Mebrek ve Louail (2024)	CO ₂ , GDP, POP, TO, EC	Uzun Vadede: EC(+), GDP(+)
Mehboob, Ma, Sadiq ve Zhang, (2024)	CB CO ₂ , NE, EV, TGLOB, GDP, PDEN	Uzun Vadede: CB CO ₂ (-), EV(-), GDP(+), TGLOB(-)
Musa, Gao, Rahman, Albattat, Ali ve Saha, (2024)	CO ₂ , GDP, EC, IND, FDI	Kısa ve Uzun Vadede: EC(+), GDP(+)
Ouni ve Abdallah (2024)	TCO ₂ , GDP, GI, FD, RE, TO	Uzun Vadede: FD(+), FDI(+), GDP(+), TCO ₂ (+)
Rahman, Murad, Mohsin, ve Wang, (2024)	CO ₂ , RE, FOS, GDP, GDP2, PAT	Uzun Vadede: FOS(-), GDP(-), GDP2(-), PAT(-), RE(-)
Khan, Abdul, Wang, Tanveer, Faheem ve Hassan, (2025)	CO ₂ , INEQ, RISK, RE, ICT	Uzun Vadede: ICT(+), INEQ(-), RE(-), RISK(+)
Kumari, Shashwat, Verma ve Giri, (2025)	CO ₂ , GDP, FOS, RE, URB	Kısa Vadede: GDP(-), RE(-) - Uzun Vadede: GDP(+), RE(+)
Xu ve Chen (2025)	CI, FDI	Kısa ve Uzun Vadede: CI(-), FD(-), FDI(-)

Değişkenler sütununda ilk değişken bağımlı değişkeni göstermektedir. (+): pozitif yönde etkiler, (-): negatif yönde etkiler, TCO₂: Ulaştırma kaynaklı CO₂ emisyonu, CBCO₂: Tüketim bazlı karbon dioksit emisyonu, EC: Enerji tüketimi, EE: Enerji verimliliği, NE: Nükleer enerji, EV: Çevresel vergiler, GDPPC: Kişi başına düşen gelir, GDP2: GSYH’nin karesi, POP: Nüfus, URB: Kentleşme, FDI: Doğrudan yabancı yatırım, FD: Finansal gelişme, EPU: Ekonomik politika belirsizliği, CORRUPT: Yolsuzluk düzeyi, GI: Yeşil inovasyon, GF: Yeşil finans, REPROD: Yenilenebilir enerji üretimi, RECONS: Yenilenebilir enerji tüketimi, CTAX: Karbon vergisi, IND: Sanayi üretimi/sanayileşme, TO: Dış ticaret açıklığı, HEX: Sağlık harcamaları, HC: İnsan sermayesi, PAT: Patentler, TGLOB: Ticaret küreselleşmesi, PDEN: Nüfus yoğunluğu, CI: Karbon yoğunluğu, CE: CO₂ verimliliği, RERD: Yenilenebilir enerji Ar-Ge harcamaları, FFRD: Fosil yakıt Ar-Ge harcamaları, INEQ: Gelir eşitsizliği, RISK: Ekonomik/finansal/siyasi riskler, ICT: Bilgi iletişim teknolojileri.

Veri seti ve model

Bu çalışmada fosil yakıt tüketimi ve yenilenebilir enerji tüketiminin karbon dioksit emisyonu üzerindeki etkileri CS-ARDL yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu amaçla, 2023 yılı itibariyle yenilenebilir kaynaklardan (hidroelektrik, güneş, rüzgâr, jeotermal, dalga ve gelgit enerjileri ve modern biyokütle) en fazla enerji tüketimine sahip ilk 10 ülkenin 1990-2021 (en son güncelleme 2021 yılına kadardır) yılları verileri analize dahil edilmiştir. Analizde kullanılan ülkeler en yüksek yenilenebilir enerji tüketimine sahip olan ülkeden başlayarak sırasıyla Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Brezilya, Kanada, Hindistan, Almanya, Japonya, Rusya Federasyonu, Fransa ve Norveç’tir. Şekil 1’de

uygulamada kullanılan ülke grubunun 2023 yılında kullandıkları yenilenebilir enerji miktarı Terawatt/saat cinsinden verilmiştir.



Şekil 1: 2023 yılı itibariyle ülkelerin Yenilenebilir Enerji Kullanımları (Terawatt Saat- Twh)

Kaynak: ourworldindata.org

Tablo 2’de değişkenlere ait temel bilgiler bulunmaktadır. Uygulamada bağımlı değişken olarak CO_2 , toplam karbon dioksit emisyonunu (metrik ton); GDP , 2015 dolar fiyatı baz alınan GSYİH; RE , toplam enerji tüketimi içerisindeki yenilenebilir enerji yüzdesi; FOS , toplam enerji tüketimi içerisindeki fosil yakıtlardan elde edilen enerji yüzdesi; $POPGR$, nüfus büyümesi ve GFC , 2015 dolar fiyatıyla sabit sermaye yatırımlarını göstermektedir.

Tablo 2: Değişkenlere Ait Bilgiler

Değişkenler	Değişkenlerin Açılımı	Kaynak
CO_2 (bağımlı değişken)	Toplam Karbon Dioksit Emisyonu (Metrik Ton)	Dünya Bankası ¹
GDP	GSYİH (2015 yılı dolar fiyatlarıyla)	Dünya Bankası
RE	Toplam Enerji Tüketimi içerisindeki Yenilenebilir Enerji Yüzdesi (%)	Dünya Bankası
FOS	Toplam Enerji Tüketimi içerisindeki Fosil Yakıttan Elde Edilen Enerji Yüzdesi (%)	Dünya Bankası
$POPGR$	Nüfus büyümesi (yıllık %)	Dünya Bankası
GFC	Sabit Sermaye Yatırımı (2015 yılı dolar fiyatlarıyla)	Dünya Bankası

Analizlerde kullanılan bütün değişkenler Dünya Bankası (WB) veri tabanı kullanılarak elde edilmiştir. Bu nedenle ülkelerin verileri maksimum aralık olacak şekilde 1990-2021 yılları arasında belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan veriler kamuya açık ikincil kaynaklardan elde edildiğinden etik kurul izni gerektirmemektedir. Değişkenlere ait ortalama, standart sapma, minimum, maksimum, çarpıklık ve basıklık değerleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3: Değişkenlere Ait Özet İstatistikler

Değişkenler	Ortalama	Std. Sapma	Min.	Maks.	Çarpıklık	Basıklık	Gözlem Sayısı
CO_2	6,77	1,38	3,52	9,44	-0,48	3,14	320
GDP	28,34	1,05	26,07	30,67	0,23	2,80	320
RE	2,66	1,01	0,69	4,11	-0,13	1,68	320
FOS	4,27	0,20	3,84	4,54	-0,55	1,80	320
$POPGR$	0,68	0,58	-1,85	2,21	0,02	3,51	320

¹ CO_2 emisyonları, gayri safi yurt içi hasıla (GDP), yenilenebilir enerji tüketimi (RE), fosil yakıt enerji tüketimi (FOS), nüfus artış oranı (POPGR) ve sabit sermaye yatırımı (GFC) değişkenlerine ait veriler Dünya Bankası World Development Indicators (WDI) veri tabanından alınmıştır. Verilere Dünya Bankası Veri Bankası üzerinden erişilmiştir (<https://databank.worldbank.org>). Erişim tarihi: 20.08.2025.

GFC	3,15	0,22	2,66	3,79	1,01	3,75	320
-----	------	------	------	------	------	------	-----

Tablo 4'te değişkenler arasındaki korelasyon ilişkileri gösterilmektedir. Buna göre, CO₂ emisyonları ekonomik büyüme (GDP) ve fosil yakıt tüketimi (FOS) ile güçlü ve pozitif, yenilenebilir enerji tüketimi (RE) ile negatif ilişki göstermektedir. Bu durum, ekonomik faaliyetler ve fosil enerji kullanımının emisyon artışını tetiklerken, yenilenebilir enerji kullanımının azaltıcı etki yarattığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, nüfus artışı (POPGR) ve sabit sermaye yatırımlarının (GFC) emisyon üzerindeki etkileri görece zayıf olup, çoklu doğrusal bağlantı (multicollinearity) problemi bulunmamaktadır.

Tablo 4: Korelasyon Matrisi

Değişkenler	CO ₂	GDP	RE	FOS	POPGR	GFC
CO ₂	1					
GDP	0,7904	1				
RE	-0,5278	-0,5271	1			
FOS	0,7561	0,5126	-0,6619	1		
POPGR	-0,1037	-0,2033	0,6191	-0,3491	1	
GFC	0,4273	0,2503	0,0261	0,3247	0,1049	1

Korelasyon sonuçlarıyla birlikte, modelde kullanılan değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı olup olmadığı da Varyans Artış Faktörü (VIF) testiyle incelenmiştir. Elde edilen değerlere göre, RE için 3.18, FOS için 2.29, POPGR için 1.69, GDP için 1.60 ve GFC için 1.33 bulunmuştur. Tüm değişkenlerin VIF değerlerinin 5'in altında olması, değişkenler arasında güçlü bir doğrusal ilişkinin bulunmadığını ve modelde çoklu doğrusal bağlantı sorununun olmadığını göstermektedir. Bu bulgu, korelasyon sonuçlarıyla da uyumlu olup, modelde kullanılan değişkenlerin birlikte kullanılmasının istatistiksel açıdan uygun olduğunu desteklemektedir.

Çalışmada enerji-ekonomi-çevre üçgeninde yer alan değişkenler kullanılarak oluşturulan model Eşitlik 1'de verilmiştir. Bu modelde enerji yapısını fosil yakıt tüketimi (FOS) ve yenilenebilir enerji tüketimi (RE), ekonomi yapısını ekonomik büyüme (GDP) ve sabit sermaye olumu (GFC) ve çevre yapısını ise sosyal bir değişken olan nüfus artış oranı (POPGR) oluşturmaktadır. Oluşturulan model ile CO₂ emisyonunu sadece ekonomik değişkenlerin değil aynı zamanda enerji ve nüfus dinamiklerinin nasıl etkilediği araştırılmıştır. Analiz öncesinde değişkenlerin tamamı doğal logaritmaya dönüştürülmüş, ancak yüzdeler bir değişken olan nüfus artış oranı (POPGR) logaritmaya dahil edilmemiştir. Buna göre modelde lnCO₂, lnGDP, lnRE, lnFOS ve lnGFC değişkenleri logaritmik biçimde kullanılmıştır. Bu dönüşüm, değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiyi güçlendirmek ve katsayıların esneklik (elasticity) yorumu yapılabilmesini sağlamak amacıyla uygulanmıştır. Modelin kurulmasında enerji-ekonomi-çevre etkileşimini inceleyen önceki çalışmalar (örneğin Abbas vd., 2020; Adebayo vd., 2023; Öztürk vd., 2023; Deka vd., 2023) temel alınmış ve değişken seçimi bu literatür doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

$$CO_2 = f(GDP, RE, FOS, POPGR, GFC)$$

$$CO_{2,it} = \beta_0 + \beta_1 GDP_{it} + \beta_2 RE_{it} + \beta_3 FOS_{it} + \beta_4 POPGR_{it} + \beta_5 GFC_{it} + \varepsilon_{it} \quad 1$$

Çalışmanın geri kalan kısmında analizlerde kullanılan yöntemler ile ilgili teorik bilgiler ve analiz sonuçları yer alacaktır.

Ekonometrik model

Yatay kesit bağımlılığı

Panel veri analizinde yatay kesit bağımlılığı (YKB), bir kesitte (örneğin bir ülke ya da firma) yaşanan yapısal değişimlerin, diğer kesit birimlerini de etkileyebildiği durumları tanımlar. Bu tür bir etkileşim, kesitler arası bağımsızlık varsayımının geçerli olmadığını ortaya koyar. Analize başlamadan önce panel veride YKB'nin olup olmadığı mutlaka test edilmelidir. Panel veri setindeki zaman boyutu (T) ile kesit sayısı (N) arasındaki farklı kombinasyonlar, hangi YKB testinin uygulanması gerektiğini etkileyebilir. Literatürde bu testlerin kullanımı 1980'li yıllara dayanmaktadır. Standart bir panel veri modeli Eşitlik 2'de sunulmuştur.

$$y_{it} = x'_{it}\beta_i + \varepsilon_{it}, \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad 2$$

Eşitlik 2'de i , yatay kesit birimlerini ve t zaman serisi gözlemlerini göstermektedir. y_{it} bağımlı değişkeni, x_{it} , $k \times 1$ boyutlu bağımsız değişkenleri ve β_i eğim parametrelerini göstermektedir. ε_{it} , x_{it} ile

yatay kesitsel bağımlı ancak korelasyonsuz hata terimidir. YKB'nin varlığının araştırılması için kurulan sıfır ve alternatif hipotezler:

$$H_0: \text{Yatay Kesit Bağımlılığı yoktur.}$$

$$H_1: \text{Yatay Kesit Bağımlılığı vardır.}$$

YKB'nin sorununun test edilmesi için birçok test geliştirilmiştir. Bu testlerden en çok bilineni Pesaran (2004) tarafından geliştirilen $CD(P_{CD})$ testidir. Ayrıca kesit sayısı sabitken $T \rightarrow \infty$ durumunda Breusch-Pagan's (1980) tarafından geliştirilen Lagrange Çarpanları (LM_{BP}) testi, $N \rightarrow \infty$ durumunda Pesaran (2004) tarafından ölçeklendirilmiş (scaled) LM_{BP} (CD_{LM}) testi ve Pesaran, Ullah ve Yamagata (2008) tarafından geliştirilen LM_{BP} istatistiğinin sapmasını dikkate alan Bias-Corrected LM_{BP} (LM_{PUY}) istatistiği YKB'nin varlığının araştırılması amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Bu testlere ait ekonometrik formülasyonlar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5: YKB Testleri ve Testlere Ait Formüller

P_{CD}	$\sqrt{\frac{2T}{N(N-1)}} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \rho_{ij}$
LM_{BP}	$T \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \rho_{ij}^2$
CD_{LM}	$\sqrt{\frac{1}{N(N-1)}} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (T\rho_{ij}^2 - 1)$
LM_{PUY}	$\sqrt{\frac{2}{N(N-1)}} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{(T-k)\rho_{ij}^2 - \mu_{Tij}}{\sigma_{Tij}}$

Tablo 5'te, $\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{\sigma_i^2 \sigma_j^2}}$, $\mu_{Tij} = \frac{1}{T-k} \text{tr}[E(M_i M_j)]$, $M_i = I - X_i(X_i' X_i)^{-1} X_i'$ ve $\sigma_{Tij} = \{\text{tr}[E(M_i M_j)]\}^2 a_{1T} + 2\text{tr}\{E[(M_i M_j)^2]\} a_{2T}$, $a_{1T} = a_{2T} - 1/(T-k)^2$ ve $a_{2T} = 3 \left(\frac{(T-k-8)(T-k+2)+24}{(T-k+2)(T-k-2)(T-k-4)} \right)^2$.

Pesaran CIPS birim kök testi

Pesaran (2007) tarafından önerilen Cross- Sectionally Augmented Im-Pesaran-Shin (CIPS) testi, Im, Pesaran ve Shin (1997, 2003)'ün geliştirdiği IPS testinin YKB'yi dikkate alan gelişmiş bir versiyonudur. CIPS testinde alternatif hipotez en az bir zaman serisinin durağan olduğunu iddia etmektedir. CIPS istatistiği, genel olarak kesitler için hesaplanan Dickey-Fuller (CADF) istatistiklerinin ortalaması alınarak elde edilir. CADF istatistiği Eşitlik 3'te verilmiştir.

$$\Delta y_{it} = a_i + b_i y_{i,t-1} + c_i \bar{y}_{t-1} + \sum_{j=0}^p d_{ij} \Delta \bar{y}_{t-j} + \sum_{j=1}^p \delta_{ij} \Delta y_{i,t-j} + \varepsilon_{it} \quad 3$$

Eşitlik 3'te y_{t-1} ve Δy_{t-1} sırasıyla değişkenin gecikmeli düzeylerini ve birinci farklarını ifade etmektedir. Zaman serileri için elde edilen CADF istatistiklerinin ortalaması alınarak elde edilen CIPS istatistiği Eşitlik 4'te olduğu gibi hesaplanır.

$$CIPS = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^n CADF_i \quad 4$$

Eğim homojenliği

Panel veri analizinde, genellikle yatay kesit birimlerinin uzun dönemli eğim katsayılarının homojen olduğu varsayılır. Ancak, analizde kullanılan değişkenler ve birimlerin özellikleri dikkate alındığında, eğim katsayılarının çoğu zaman heterojen bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle, uygulanacak testlerin bu heterojenlik durumunu dikkate alacak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Eğim homojenliğinin test edilmesi için Pesaran ve Yamagata (2008) tarafından geliştirilen yatay kesitlerin ağırlıklandırılmış eğimleri arasındaki farklılığa dayanan test iki farklı istatistik vermektedir. Teste ilişkin hipotezler ve test istatistikleri Eşitlik 5'te verilmiştir.

$$H_0 = \beta_i = \beta, \quad \forall_i \text{ (Eğim katsayıları homojendir)}$$

$$H_1 = \beta_i \neq \beta, \text{ en az bir } i \text{ için (Eğim Katsayılarının en az biri farklıdır.)} \quad 5$$

$$\tilde{\Delta} = \sqrt{N} \left(\frac{N^{-1} S\% - k}{\sqrt{2k}} \right) \text{ ve } \tilde{\Delta}_{adj} = \sqrt{N} \left(\frac{N^{-1} S\% - k}{\sqrt{\frac{2k(T-k-1)}{T+1}}} \right)$$

Eşitlik 5'te $\tilde{\Delta}$ ve $\tilde{\Delta}_{adj}$, sırasıyla eğim homojenliği ve sapmaya karşı düzeltilmiş eğim katsayısı, S , Swamy (1970) test istatistiği ve k , bağımsız değişken sayısıdır.

Westerlund eşbütünleşme testi

Yatay kesit bağımlılığı ve eğim heterojenliğinin olduğu panel veri analizinde değişkenler arasındaki uzun dönemli bir ilişkinin olup olmadığının test edilmesi ve uygun testin belirlenmesi gerekmektedir. Westerlund (2007) tarafından geliştirilen hata düzeltme modelini (ECM) temel alan eşbütünleşme testi paneldeki YKB ve heterojenliği dikkate alan bir eşbütünleşme testidir. Bu testte sıfır hipotezi panelde eşbütünleşme olmadığını ve alternatif hipotez eşbütünleşme olduğunu iddia etmektedir. Teste ilişkin istatistikler Eşitlik 6'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} G_t &= n^{-1} \sum_{i=1}^N \frac{T\alpha_i}{(\alpha_i)} \\ G_a &= n^{-1} \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{SE(\alpha_i)} \\ P_t &= \frac{\alpha}{SE(\alpha)} \\ P_a &= T\alpha \end{aligned} \quad 6$$

Eşitlik 6'da P_t ve P_a , havuzlanmış panel istatistiklerini, G_t ve G_a grup ortalama istatistiklerini ve α_i düzeltme katsayısını göstermektedir. Bu testin amacı seriler arasında uzun dönemli bir denge ilişkisi olup olmadığını ve bu dengeye geri dönüş hızını ölçmektir. Eğer panelde bir eşbütünleşme varsa modelin uzun dönemde dengeye ulaşması (convergence) beklenir.

CS-ARDL

Klasik Otoregresif Dağıtılmış Gecikmeli (ARDL) modeli, YKB'nin bulunmadığı ve paneldeki birimlerin benzer yapısal özellikler taşıdığı (homojenlik) varsayımına dayanmaktadır. Ancak modellerde yer alan gözlemlenemeyen ortak bileşenler veya yapısal faktörler, birimler arasında YKB'ye yol açabilmektedir. Bu durum dikkate alındığında, temel ARDL modeli hem eğim katsayılarındaki heterojenliği hem de yatay kesit bağımlılığını dikkate almakta yetersiz kalmaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek amacıyla Chudik ve Pesaran (2015), $I(0)$ ve $I(1)$ düzeyinde bütünleşik serilerin varlığı durumunda YKB'yi dikkate alabilen ve havuzlanmış uzun dönemli katsayı tahminleri üretebilen gelişmiş bir ARDL türü olan CS-ARDL'yi geliştirmiştir. Bu tahminleyici aynı zamanda modelde yer almayan değişkenlerden kaynaklanan sapmaları da dikkate almaktadır. CS-ARDL tahminleme yöntemi katsayı tahminlemesinde dayanıklı sonuçlar üretirken sapmaya karşı dayanıklıdır. Aynı zamanda büyük ve küçük örnekler için uygundur. CS-ARDL modeli Eşitlik 7'de verilmiştir.

$$y_{it} = \alpha_i + \sum_{l=1}^{p_y} \lambda_{l,i} y_{i,t-l} + \sum_{l=0}^{p_x} \beta_{l,i} x_{i,t-l} + \sum_{l=0}^{p_\varphi} \varphi'_{i,l} \bar{z}_{i,t-l} + \varepsilon_{it} \quad 7$$

Eşitlik 7'de $\bar{z}_{i,t-l}$, gecikmeli kesit ortalamalarını, λ, β ve φ katsayıları, p_y ve p_x her bir değişken için gecikmeleri ve p_φ modele eklenen yatay kesit ortalamalarını gecikmesini temsil etmektedir. Uzun dönemli katsayıların ortalama grup tahminleri:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{CS-ARDL,i} &= \frac{\sum_{l=0}^{p_x} \hat{\beta}_{li}}{1 - \sum_{l=0}^{p_y} \hat{\lambda}_{li}}, \\ \hat{\theta}_{MG} &= N^{-1} \sum_{i=1}^N \hat{\theta}_i \end{aligned} \quad 8$$

Eşitlik 8'de $\hat{\theta}_i$ her bir yatay kesitteki bireysel parametre tahminlerini göstermektedir. CS-ARDL modelinin hata düzeltilmiş formu (kısa dönem tahmini):

$$\Delta y_{it} = \phi_i [y_{i,t-l} - \hat{\theta}_i x_{i,t}] - \alpha_i + \sum_{l=1}^{p_y-1} \lambda_{l,i} \Delta y_{i,t-l} + \sum_{l=0}^{p_x} \beta_{l,i} \Delta x_{i,t-l} + \sum_{l=0}^{p_\varphi} \varphi'_{i,l} \Delta \bar{z}_{i,t-l} + u_{it} \quad 9$$

Eşitlik 9'da ϕ_i hata düzeltme hızını (uyum) göstermektedir.

Analiz sonuçları ve bulgular

Çalışmada CO_2 emisyonlarını etkileyen değişkenlerin uzun ve kısa dönemdeki davranışlarını elde etmeden önce değişkenlerde ve modelde YKB'nin varlığı araştırılmıştır. Bütün değişkenler ve model için LM_{BP} , CD_{LM} , LM_{PUY} ve Pesaran CD test değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6 sonuçları dikkate alındığında bütün değişkenlerde ve modelde YKB'nin varlığı %1 seviyesinde doğrulanmıştır. Testlerin en az birinin YKB'nin var olduğunu göstermesi YKB'nin kanıtı olarak kabul edilmiştir.

Tablo 6: Değişken ve Model Düzeyinde Yatay Kesit Bağımlılığı Sonuçları

Değişken	Breusch-Pagan LM	Pesaran scaled LM	Bias-corrected scaled LM	Pesaran CD
CO_2	558,935***	54,173***	54,012***	1,928*
GDP	1271,256***	129,258***	129,097***	35,500***
RE	513,067***	49,338***	49,177***	2,780***
FOS	499,373***	47,895***	47,733***	-1,145
$POPGR$	371,065***	34,370***	34,209***	7,906***
GFC	268,488***	23,557***	23,396***	-0,586
<i>Model</i>	335,858***	30,659***	30,497***	-3,823***

Not: ***, **, * sırasıyla %1, %5 ve %10 seviyesinde istatistiki anlamlılığı ifade etmektedir.

Hem değişken hem de model düzeyinde YKB'nin varlığı nedeniyle birim kök araştırılmış ve Pesaran CIPS testi sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'ye göre değişkenlerin hem sabitli hem de sabit+trendli durumları dikkate alınırsa $I(0)$ 'da durağan olmadıkları ancak birinci farkları alındığında $I(1)$ 'de %1 anlamlılık düzeyinde durağan oldukları görülmüştür.

Tablo 7: Pesaran CIPS Birim Kök Testi Sonuçları

Değişkenler	Düzeyde		Birinci Farkta (Δ)	
	Sabit	Sabit+Trend	Sabit	Sabit+Trend
CO_2	-1,891	-2,123	-4,710***	-4,943***
GDP	-2,662***	-2,587	-3,601***	-3,852***
RE	-0,853	-2,197	-4,841***	-4,875***
FOS	-1,932	-1,966	-5,040***	-5,195***
$POPGR$	-1,617	-1,82	-3,163***	-3,135***
GFC	-1,763	-1,852	-4,052***	-4,199***

Not: ***, **, * sırasıyla %1, %5 ve %10 seviyesinde istatistiki anlamlılığı ifade etmektedir.

Değişkenler arasındaki ilişkiler belirlenmeden ve çalışmanın ana tahminleme yöntemi olan CS-ARDL modeli kurulmadan önce model üzerinde eğim homojenliği ve eşbütünleşme testleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 8'de eğim homojenliği test sonuçları yer almaktadır. Tabloya göre Delta ve Adj. Delta istatistikleri %1 önem seviyesinde anlamlı bulunmuştur. Bu sonuç analize dahil edilen ülkelerin CO_2 emisyonlarının birbirlerinden farklı olduklarını göstermektedir.

Tablo 8: Eğim Homojenliği Testi

Model	Delta	Adj. Delta
$CO_2 = f(GDP, RE, FOS, POPGR, GFC)$	18,741***	21,203***

Not: ***, **, * sırasıyla %1, %5 ve %10 seviyesinde istatistiki anlamlılığı ifade etmektedir.

Tablo 9'da Westerlund eşbütünleşme testi sonuçları yer almaktadır. Test sonuçlarına göre hem grup istatistikleri (G_t ve G_a) hem de panel istatistikleri (P_t ve P_a) eşbütünleşmenin olmadığı sıfır hipotezini %1 anlamlılık seviyesinde reddetmiştir. Buna göre analizde kullanılan değişkenler arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisi olduğu sonucu elde edilmiştir.

Tablo 9: Westerlund Eşbütünleşme Testi

Model	Grup İstatistikleri		Panel İstatistikleri	
	G_t	G_a	P_t	P_a
$CO_2 = f(GDP, RE, FOS, POPGR, GFC)$	-2,523*	-10,068***	-7,268***	-7,813***

Not: ***, **, * sırasıyla %1, %5 ve %10 seviyesinde istatistiki anlamlılığı ifade etmektedir.

Tablo 10, CO₂ emisyonu ile bağımsız değişkenler arasındaki CS-ARDL sonuçlarını göstermektedir. Modeldeki ECM teriminin negatif ve istatistiksel olarak anlamlı olması, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisi olduğunu doğrulamaktadır. ECM katsayısının -1.117 olması, kısa dönem sapmaların bir sonraki dönemde %111.7 oranında düzeltildiğini ve modelin hızlı bir şekilde uzun dönem denge seviyesine geri döndüğünü göstermektedir. Bu da sistemin dinamik yapısında güçlü bir geri dönüş mekanizmasının varlığını işaret etmektedir. Ayrıca ECM değerinin -1'den küçük olması modelin dengeye gelirken dalgalı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Model sonuçları enerji yapısı yönünden yorumlandığında, FOS değişkeninin CO₂ emisyonuna en fazla katkıyı yaptığı görülmektedir. Değişkenin katsayısı kısa dönemde 1.117 ve uzun dönemde 0.914 bulunmuştur. Her iki dönem için FOS değişkeni %1 önem seviyesinde anlamlıdır. Buna göre FOS değişkenindeki %1'lik bir artış CO₂ emisyonunda kısa dönemde %1.117 artışa neden olurken uzun dönemde bu etki azalmış ve %0.914 olarak bulunmuştur. Yenilenebilir enerjiyi temsil eden RE değişkeni ele alınırsa katsayıları kısa dönemde -0.134 (p=0.025) ve uzun dönemde -0,131 (0.027) elde edilmiştir. Beklenildiği gibi RE değişkenindeki %1'lik bir artış ise CO₂ emisyonunda kısa dönemde %0.134 ve uzun dönemde %0.131 azalmaya neden olmaktadır.

Tablo 10: Kısa ve Uzun Dönemli CS-ARDL Sonuçları

		<i>Model</i>	
		<i>co2 = f(gdp, re, fos, popgr, gfc)</i>	
<i>Dönem</i>	<i>Değişkenler</i>	<i>Katsayılar</i>	<i>P-değeri</i>
<i>Kısa Dönem</i>	<i>GDP</i>	0,658	0,000
	<i>RE</i>	-0,134	0,025
	<i>FOS</i>	1,117	0,000
	<i>POPGR</i>	0,070	0,003
	<i>GFC</i>	-0,091	0,065
<i>Uzun Dönem</i>	<i>GDP</i>	0,606	0,000
	<i>RE</i>	-0,131	0,027
	<i>FOS</i>	0,914	0,000
	<i>POPGR</i>	0,059	0,005
	<i>GFC</i>	-0,077	0,047
	<i>ECM(-1)</i>	-1,117	0,000

Model sonuçları ekonomik yapı yönünden incelendiğinde, ekonomik büyümeyi temsil eden GDP değişkeninin kısa dönemde 0.658 (p=0.000) ve uzun dönemde 0.606 (0.000) olduğu görülmektedir. Buna göre GDP değişkenindeki %1'lik bir artışın CO₂ emisyonunu kısa dönemde %0.658 ve uzun dönemde %0.606 artırdığı elde edilmiştir. Sabit sermaye yatırımlarını temsil eden GFC değişkeni kısa dönemde %10 önem seviyesinde -0.091 katsayısı ile anlamlı bulunmuştur. Bu sonuç GFC değişkeninin diğer değişkenlere göre CO₂ emisyonuna katkısı sınırlıdır. Uzun dönemde ise %5 önem seviyesinde -0.077 katsayısı ile CO₂ emisyonunu azaltma yönünde etkisi vardır. Buna göre GFC'de %1'lik artış uzun dönemde CO₂ emisyonunda %0.077 azalmaya neden olmaktadır. Geçmiş çalışmalar dikkate alındığında gcf değişkeninin CO₂ emisyonuna pozitif katkı sağlaması beklenmektedir. Ancak çalışmada kullanılan ülke grubu gelişmiş ülkeler olduğundan teknolojiye yapılan yatırımlar bu değişkenin beklenen etkisinin ters yönde oluşmasına neden olmuştur (Abbas vd., 2020; Öztürk vd., 2023).

Son olarak, sosyal yapıyı temsil eden değişkenler açısından model sonuçları incelendiğinde, nüfus büyümesini gösteren POPGR değişkeninin katsayısı kısa dönemde 0.07 (0.003), uzun dönemde ise 0.059 (0.005) olarak bulunmuştur. Modelde yer alan diğer değişkenler logaritmik forma dönüştürüldüğünden yorumlar yüzde değişim üzerinden yapılmıştır. Ancak POPGR değişkeni logaritmik dönüşüme tabi tutulmadan modele dahil edilmiştir. Bu nedenle bu değişken için yorumlar mutlak birim artış ve bağıl artış (örneğin %10'luk değişim) üzerinden yapılmıştır. Buna göre, POPGR değişkenindeki 1 birimlik artış, CO₂ emisyonunu kısa dönemde %7, uzun dönemde ise %5.9 oranında artırmaktadır. Nüfus artış hızlarının genellikle küçük oranlarla ifade edilmesi dikkate alındığında, POPGR'deki %10'luk bağıl bir artışın (örneğin %1'den %1.1'e yükselmesi), kısa dönemde CO₂ emisyonlarını yaklaşık %0.7, uzun dönemde ise %0.59 oranında artırdığı görülmektedir.

Bu bulguların nedensellik yönü, modelin hata düzeltme katsayısı (ECM) ile tutarlılık göstermektedir. ECM katsayısının negatif ve anlamlı olması, değişkenler arasında uzun dönemli bir ilişki bulunduğunu ve kısa dönem sapmaların dengeye geri döndüğünü göstermektedir. Bu ilişkinin nedensellik yönünü doğrulamak amacıyla ayrıca Dumitrescu ve Hurlin (2012) panel Granger nedensellik testi uygulanmıştır. Tablo 11'e bakıldığında, CO₂ emisyonları ile GDP, RE, FOS ve POPGR değişkenleri arasında tek yönlü nedensellik ilişkileri olduğunu görülmektedir. Buna karşılık GFC'den CO₂ emisyonlarına doğru anlamlı bir nedensellik tespit edilmemiştir. Bu bulgular, CS-ARDL modelinde elde edilen hata düzeltme katsayısının gösterdiği uzun dönem ilişkilerle tutarlıdır ve modelin nedensel geçerliliğini güçlendirmektedir.

Tablo 11: Dumitrescu ve Hurlin (2012) Panel Granger Nedensellik Testi Sonuçları

Nedensellik Yönü	Z-bar	p-değeri
GDP → CO ₂	7,11	0,000
RE → CO ₂	4,56	0,000
FOS → CO ₂	5,05	0,000
POPGR → CO ₂	5,79	0,000
GFC → CO ₂	0,91	0,514

Not: Dumitrescu ve Hurlin (2012) heterojen panel Granger nedensellik testi sonuçlarıdır. H₀: "X değişkeni CO₂'nin nedeni değildir." p < 0.05 değerlerinde H₀ reddedilmiştir. **Kaynak:** Dumitrescu ve Hurlin (2012).

Sonuç olarak, Dumitrescu ve Hurlin (2012) testiyle elde edilen nedensellik ilişkileri, CS-ARDL modelinde tespit edilen uzun dönem bulgularını desteklemekte ve analiz sonuçlarının sağlamlığını teyit etmektedir. Böylece hem enerji hem de ekonomik değişkenlerin CO₂ emisyonları üzerindeki yönlü etkileri istatistiksel olarak da güçlendirilmiştir.

Sonuç

Bu çalışma, yenilenebilir enerji kullanımında ön plana çıkan ülkeler örnekleminde, CO₂ emisyonlarını etkileyen temel ekonomik, enerji ve demografik belirleyicileri ampirik olarak incelemeyi amaçlamıştır. Panel veri analizinde 1996–2021 dönemine ait veriler kullanılarak, değişkenler arasında hem kısa hem de uzun dönemli ilişkiler Cross-Sectionally Augmented Autoregressive Distributed Lag (CS-ARDL) modeli ile tahmin edilmiştir. Analiz sürecinde yatay kesit bağımlılığı, durağanlık, eğim homojenliği ve eşbütünleşme gibi panel veri analizinin temel varsayımları dikkate alınmış; test sonuçları doğrultusunda ekonometrik modelleme gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen bulgular, özellikle fosil yakıt tüketiminin CO₂ emisyonları üzerinde güçlü ve istatistiksel olarak anlamlı bir artış yönlü etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık, yenilenebilir enerji kullanımındaki artışların emisyonları hem kısa hem de uzun vadede azalttığı görülmüştür. Ekonomik büyümenin CO₂ emisyonlarını artırıcı yönde etkisi sürerken, sabit sermaye yatırımları uzun vadede emisyonları düşürücü bir rol üstlenmiştir. Bu durum, gelişmiş ülkelerdeki teknoloji odaklı yatırım yapısının çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunduğunu düşündürmektedir. Ayrıca nüfus artış oranı da emisyonlar üzerinde pozitif ve anlamlı bir etkiye sahiptir.

Bu sonuçlar, literatürdeki mevcut ampirik kanıtlarla büyük ölçüde örtüşmektedir. Örneğin, Abbas vd. (2020), Shao vd. (2021) ve Abbasi vd. (2022) çalışmalarında olduğu gibi bu çalışmada da yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını azaltıcı, fosil yakıt tüketiminin ise artırıcı etkisi doğrulanmıştır. Benzer biçimde, Mehmood vd. (2022) ve Deka vd. (2023) ekonomik büyümenin emisyonları artırıcı yönlü etkisini ortaya koyarken, bu çalışmada da GDP değişkeninin pozitif ve anlamlı etkisi elde edilmiştir. Ayrıca, sabit sermaye yatırımlarının uzun dönemde emisyonları azaltıcı etkisinin tespit edilmesi, literatürde az sayıda çalışmada (örneğin, Öztürk vd., 2023; Tang vd., 2023) vurgulanan teknoloji odaklı sermaye birikiminin çevresel kaliteye katkısıyla uyumludur. Bu sonuç, gelişmiş ülke örnekleminde teknoloji temelli yatırımların emisyon azaltımında oynadığı rolü desteklemektedir.

Bu bulgular doğrultusunda, çevre dostu enerji politikalarının uygulanması ve fosil yakıtlardan yenilenebilir kaynaklara geçişin hızlandırılması, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada kritik öneme sahiptir. Yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılması, özellikle gelişmiş ekonomilerde çevresel kalitenin korunmasına katkı sağlayabilir. Ayrıca sermaye yatırımlarının teknoloji odaklı alanlara

yönlendirilmesi ve nüfus artışının çevresel etkilerinin azaltılması yönünde bütüncül politikalar geliştirilmesi, uzun vadeli emisyon azaltımı açısından stratejik bir gerekliliktir.

Ayrıca politika tasarımlarında, karbon fiyatlandırma mekanizmalarının etkinleştirilmesi, yeşil vergi uygulamalarının güçlendirilmesi ve yenilenebilir enerjiye yönelik Ar-Ge yatırımlarının artırılması kritik öneme sahiptir. Gelişmiş ekonomiler için çevreci inovasyonun teşviki, enerji verimliliğini artıracak teknolojilerin desteklenmesi ve uluslararası yeşil finansman kaynaklarının etkin kullanımı uzun vadeli emisyon azaltımını destekleyecektir. Bununla birlikte, gelişmekte olan ülkelerin bu süreçte teknoloji transferi, kapasite geliştirme ve yenilenebilir altyapı yatırımlarına öncelik vermeleri sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından stratejik bir gerekliliktir.

Gelecek araştırmalar açısından, CO₂ emisyonlarını etkileyen faktörlerin farklı ülke grupları (örneğin OECD, BRICS, G20) veya sektörel düzeyde (sanayi, ulaştırma, tarım vb.) karşılaştırmalı olarak incelenmesi yararlı olacaktır. Ayrıca, yenilenebilir enerji teknolojilerinde yapay zekâ tabanlı verimlilik göstergeleri, karbon fiyatlandırma sistemleri, yeşil finansman araçları ve kurumsal kalite değişkenlerinin modele dâhil edilmesi, çevresel sürdürülebilirliği daha kapsamlı biçimde açıklayabilir. Gelecekteki çalışmalarda Fourier, Emirmahmutoğlu ve Köse veya Konya bootstrap gibi gelişmiş nedensellik testlerinin uygulanmasında, enerji-ekonomi-çevre ilişkisinin uzun dönemli ve nedensel dinamiklerinin daha derinlemesine analiz edilmesine olanak sağlayacaktır. Bu yönüyle mevcut çalışma, metodolojik çerçevesi ve ampirik bulgularıyla ileride yapılacak araştırmalara hem teorik hem de uygulamalı düzeyde güçlü bir referans noktası sunmaktadır.

Hakem Değerlendirmesi / Peer-review:

Dış bağımsız

Externally peer-reviewed

Çıkar Çatışması / Conflict of interests:

Yazar çıkar çatışması bildirmemiştir.

The author has no conflict of interest to declare.

Finansal Destek / Grant Support:

Yazar bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir.

The author declared that this study has received no financial support.

Kaynakça / References

- Abbas, Q., Nurunnabi, M., Alfakhri, Y., Khan, W., Hussain, A., & Iqbal, W. (2020). The role of fixed capital formation, renewable and non-renewable energy in economic growth and carbon emission: a case study of Belt and Road Initiative project. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 45476–45486. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10413-y>
- Abbasi, K. R., Shahbaz, M., Zhang, J., Irfan, M., & Alvarado, R. (2022). Analyse the environmental sustainability factors of China: The role of fossil fuel energy and renewable energy. *Renewable Energy*, 187, 390–402. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.066>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160181>
- Akın, F. (2025). Karbon Emisyonlarını Azaltmada Yenilenebilir Enerjinin Rolü: Çevresel Performans Endeksinde Başarılı Olan 10 Ülkeden Kanıtlar. *Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi*, 60(2), 1525–1542. <https://doi.org/10.63556/tisej.2025.1492>
- Ali, M., & Seraj, M. (2022). Nexus between energy consumption and carbon dioxide emission: evidence from 10 highest fossil fuel and 10 highest renewable energy-using economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 87901–87922. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21900-9>

- Ali, S., Yusop, Z., Kaliappan, S. R., & Chin, L. (2020). Dynamic common correlated effects of trade openness, FDI, and institutional performance on environmental quality: evidence from OIC countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(11), 11671-11682. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07768-7>
- Asongu, S. A., Agboola, M. O., Alola, A. A., & Bekun, F. V. (2020). The criticality of growth, urbanisation, electricity and fossil fuel consumption to environment sustainability in Africa. *Science of the Total Environment*, 712, 136376. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136376>
- Azam, M., Uddin, I., Khan, S., & Tariq, M. (2022). Are globalisation, urbanisation, and energy consumption cause carbon emissions in SAARC region? New evidence from CS-ARDL approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 87746-87763. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21835-1>
- 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.
- 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>
- Çobanoğulları, G. (2024). Exploring the link between CO₂ emissions, health expenditure, and economic growth in Türkiye: evidence from the ARDL model. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 29605-29619. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04835-8>
- Deka, A., Yakubu Bako, S., Özdeşer, H., & Seraj, M. (2023). The impact of energy efficiency in reducing environmental degradation: does renewable energy and forest resources matter? *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 86957-86972. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28434-8>
- Dumitrescu, E. I. ve Hurlin, C. (2012). Testing for Granger non-causality in heterogeneous panels. *Economic Modelling*, 29(4), 1450-1460. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2012.02.014>
- Dünya Bankası (2025). *World Development Indicators*. Dünya Bankası Veri Bankası. <https://databank.worldbank.org> (Erişim tarihi: 20.08.2025).
- Dünya Sağlık Örgütü / World Health Organization. (2023, 12 Ekim). *Climate change and health*. Retrieved 20 August 2025, from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- Ebaidalla, M. E. (2024). The impact of taxation, technological innovation and trade openness on renewable energy investment: Evidence from the top renewable energy producing countries. *Energy*, 306, 132539. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132539>
- Eid, A. G., Mrabet, Z., & Alsamara, M. (2024). Assessing the impact of energy R&D on green growth in OECD countries: a CS-ARDL analysis. *Environmental Economics and Policy Studies*. <https://doi.org/10.1007/s10018-024-00413-4>
- Feng, M. Q., Morake, O., Sampene, A. K., & Agyeman, F. O. (2024). Trade openness, human capital, natural resource, and carbon emission nexus: a CS-ARDL assessment for Central Asian economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 31424-31442. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33059-6>
- Hao, L.-N., Umar, M., Khan, Z., & Ali, W. (2021). Green growth and low carbon emission in G7 countries: How critical the network of environmental taxes, renewable energy and human capital is? *Science of the Total Environment*, 752, 141853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141853>
- Ibrahim, R. L. (2022). Post-COP26: can energy consumption, resource dependence, and trade openness promote carbon neutrality? Homogeneous and heterogeneous analyses for G20 countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(57), 86759-86770. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21855-x>
- Ibrahim, R. L., Ajide, K. B., Usman, M., & Kousar, R. (2022). Heterogeneous effects of renewable energy and structural change on environmental pollution in Africa: Do natural resources and environmental technologies reduce pressure on the environment? *Renewable Energy*, 200, 244-256. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.134>
- Im, K. S., Pesaran, M. H., & Shin, Y. (2003). Testing for unit roots in heterogeneous panels. *Journal of Econometrics*, 115(1), 53-74.

- Im, K. S., Pesaran, M. H., & Shin, Y. (1997). *Testing for unit roots in heterogeneous panels* (Working Paper). University of Cambridge.
- Ito, K. (2017). CO₂ emissions, renewable and non-renewable energy consumption, and economic growth: Evidence from panel data for developing countries. *International Economics*, 151, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2017.02.001>
- Khan, M. A., Abdul, D., Wang, W., Tanveer, A., Faheem, M., & Hassan, T. (2025). The dynamic role of income inequality, renewable energy and risk components towards environmental sustainability: fresh insights through CS-ARDL approach. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-025-06024-7>
- Kumari, D., Shashwat, S., Verma, P. K., & Giri, A. K. (2025). Examining the nexus between carbon dioxide emissions, economic growth, fossil fuel energy use, urbanisation and renewable energy towards achieving environmental sustainability in India. *International Journal of Energy Sector Management*, 19(3), 731–746. <https://doi.org/10.1108/IJESM-05-2024-0007>
- Kuo, M.-H., Lin, T.-C., & Ho, C.-C. (2022). Fresh evidence on environmental quality measures using natural resources, renewable energy, non-renewable energy and economic growth for 10 Asian nations from CS-ARDL technique. *Fuel*, 320, 123914. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123914>
- Li, S., Samour, A., Irfan, M., & Ali, M. (2023). Role of renewable energy and fiscal policy on trade adjusted carbon emissions: Evaluating the role of environmental policy stringency. *Renewable Energy*, 205, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.047>
- Li, Y., Alharthi, M., Ahmad, I., Hanif, I., & Hassan, M. U. (2022). Nexus between renewable energy, natural resources and carbon emissions under the shadow of transboundary trade relationship from South East Asian economies. *Energy Strategy Reviews*, 41, 100855. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100855>
- Li, Z., Hu, S., Mehmood, U., & Agyekum, E. B. (2022). Assessing the linkages of economic freedom and environmental quality in South Asian Countries: application of CS-ARDL. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 66405–66412. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20351-6>
- Lu, Y., Tian, T., & Ge, C. (2023). Asymmetric effects of renewable energy, fintech development, natural resources, and environmental regulations on the climate change in the post-covid era. *Resources Policy*, 85, 103902. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103902>
- Mebrek, N., & Louail, B. (2024). The impact of economic growth on CO₂ emissions in East Asian and North African Countries during the period 1990-2020 using the CS-ARDL model. *International Journal of Economic Perspectives*, 18(4), 790–804. <https://ijeponline.org/index.php/journal/article/view/594>
- Mehboob, M. Y., Ma, B., Sadiq, M., & Zhang, Y. (2024). Does nuclear energy reduce consumption-based carbon emissions: The role of environmental taxes and trade globalisation in highest carbon emitting countries. *Nuclear Engineering and Technology*, 56, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.09.022>
- Mehmood, U. (2021). *Renewable energy and foreign direct investment: Does the governance matter for CO₂ emissions? Application of CS-ARDL*. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(13), 19816–19822. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17222-x>
- Mehmood, U. (2022). Investigating the linkages of female employer, education expenditures, renewable energy, and CO₂ emissions: Application of CS-ARDL. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(40), 61277–61282. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20275-1>
- Mehmood, U., Agyekum, E. B., Uhunamure, S. E., Shale, K., & Mariam, A. (2022). Evaluating the influences of natural resources and ageing people on CO₂ emissions in G-11 nations: Application of CS-ARDL approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1449. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031449>
- Meng, Y., Wu, H., Wang, Y., & Duan, Y. (2022). International trade diversification, green innovation, and consumption-based carbon emissions: The role of renewable energy for sustainable development in BRICST countries. *Renewable Energy*, 198, 1243–1253. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.045>
- Musa, M., Gao, Y., Rahman, P., Albattat, A., Ali, M. A. S., & Saha, S. K. (2024). Sustainable development challenges in Bangladesh: an empirical study of economic growth, industrialisation, energy consumption, foreign investment, and carbon emissions—using dynamic ARDL model and

- frequency domain causality approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02680-3>
- Ouni, M., & Ben Abdallah, K. (2024). Environmental sustainability and green logistics: Evidence from BRICS and Gulf countries by cross-sectionally augmented autoregressive distributed lag (CS-ARDL) approach. *Sustainable Development*, 32(4), 3753–3770. <https://doi.org/10.1002/sd.2856>
- Öztürk, S., Han, V., & Özsolak, B. (2023). How do renewable energy, gross capital formation, and natural resource rent affect economic growth in G7 countries? Evidence from the novel GMM-PVAR approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 78438–78448. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27958-3>
- Pan, B., Adebayo, T. S., Ibrahim, R. L., & Al-Faryan, M. A. S. (2023). Does nuclear energy consumption mitigate carbon emissions in leading countries by nuclear power consumption? Evidence from quantile causality approach. *Energy & Environment*, 34(7), 2521–2543. <https://doi.org/10.1177/0958305X221112>
- 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., & 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>
- 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.
- Rahman, A., Murad, S. M. W., Mohsin, A. K. M., & Wang, X. (2024). Does renewable energy proactively contribute to mitigating carbon emissions in major fossil fuels consuming countries? *Journal of Cleaner Production*, 452, 142113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142113>
- Sadiq, M., Chau, K. Y., Ha, N. T. T., Phan, T. T. H., Ngo, T. Q., & Huy, P. Q. (2024). The impact of green finance, eco-innovation, renewable energy and carbon taxes on CO₂ emissions in BRICS countries: Evidence from CS ARDL estimation. *Geoscience Frontiers*, 15(4), 101689. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101689>
- Sadiq, M., Hassan, S. T., Khan, I., & Rahman, M. M. (2024). Policy uncertainty, renewable energy, corruption and CO₂ emissions nexus in BRICS-1 countries: A panel CS-ARDL approach. *Environment, Development and Sustainability*, 26(8), 21595–21621. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03546-w>
- Schmalensee, R. (2012). From “Green Growth” to sound policies: An overview. *Energy Economics*, 34, S2–S6. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.08.041>
- Shao, X., Zhong, Y., Liu, W., & Li, R. Y. M. (2021). Modeling the effect of green technology innovation and renewable energy on carbon neutrality in N-11 countries? Evidence from advance panel estimations. *Journal of Environmental Management*, 296, 113189. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113189>
- Sharif, A., Kartal, M. T., Bekun, F. V., Pata, U. K., Foon, C. L., & Depren, S. K. (2023). Role of green technology, environmental taxes, and green energy towards sustainable environment: Insights from sovereign Nordic countries by CS-ARDL approach. *Gondwana Research*, 117, 194–206. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.01.009>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142538>
- Sohail, A., Du, J., & Abbasi, B. N. (2023). Exploring the interrelationship among health status, CO₂ emissions, and energy use in the top 20 highest emitting economies: based on the CS-DL and CS-ARDL approaches. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 16, 1419–1442. <https://doi.org/10.1007/s11869-023-01350-z>
- Su, C. W., Umar, M., & Khan, Z. (2021). Does fiscal decentralisation and eco-innovation promote renewable energy consumption? Analysing the role of political risk. *Science of the Total Environment*, 751, 142220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142220>

- Swamy, P. A. (1970). Efficient inference in a random coefficient regression model. *Econometrica*, 38(2), 311–323.
- Tang, Q., Shahla, R., Aliyeva, L., & Huseynova, S. (2023). Moderating role of carbon emission and institutional stability on renewable energy across developing countries. *Renewable Energy*, 209, 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.113>
- Vo, D. H., Ho, C. M., Le, Q. T. T., & Vo, A. T. (2022). Revisiting the energy-growth-environment nexus in the OECD countries: An application of the CS-ARDL approach. *Energy, Sustainability and Society*, 12, 47. <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00375-z>
- Voumik, L. C., Mimi, M. B., & Raihan, A. (2023). Nexus between urbanisation, industrialisation, natural resources rent, and anthropogenic carbon emissions in South Asia: CS-ARDL approach. *Anthropocene Science*, 2, 48–61. <https://doi.org/10.1007/s44177-023-00047-3>
- Wang, H., & Zhang, D. (2023). Examining the interplay between fossil fuel mining, sustainable growth, and economic prosperity. *Resources Policy*, 87, 104324. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104324>
- Wang, K., Rehman, M. A., Fahad, S., & Linzhao, Z. (2023). Unleashing the influence of natural resources, sustainable energy and human capital on consumption-based carbon emissions in G-7 countries. *Resources Policy*, 81, 103384. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103384>
- 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>
- Wu, L., Adebayo, T. S., Yue, X.-G., & Umut, A. (2023). The role of renewable energy consumption and financial development in environmental sustainability: implications for the Nordic Countries. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 30(1), 21–36. <https://doi.org/10.1080/13504509.2022.2115577>
- Xu, R., & Chen, G. (2025). Does China's outward direct investment decrease carbon intensity in ASEAN countries? Evidence from CS-ARDL model analysis. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 17(1), 527–542. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-07-2024-0120>
- Yin, C., & Qamruzzaman, M. (2024). Empowering renewable energy consumption through public-private investment, urbanisation, and globalisation: Evidence from CS-ARDL and NARDL. *Heliyon*, 10, e26455. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26455>