

Teknoloji, Yenilenebilir Enerji ve Sürdürülebilir Büyüme Ekseninde Çevre Kalitesi: CS-ARDL AnaliziFatih Akın¹ , Selin Dinçer² , Ayşenur Şakalak³ **ÖZET**

Amaç: Bu çalışmada, 1990-2022 döneminde G-7 ülkelerinde yenilenebilir enerji, sürdürülebilir büyüme ve araştırma-geliştirme (Ar-Ge) harcamalarının çevre kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

Yöntem: Çalışmada yenilenebilir enerji, sürdürülebilir büyüme ve Ar-Ge harcamalarının çevre kalitesi üzerindeki etkileri incelenirken panel CS-ARDL yöntemi kullanılmıştır.

Bulgular: DH eşbütünleşme testi sonuçları, karbon emisyonları ile incelenen değişkenler arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisi bulunduğunu doğrulamaktadır. CS-ARDL analizi bulguları, ekonomik büyümenin başlangıçta karbon emisyonlarını artırdığını, ancak belirli bir gelir seviyesinden sonra bu etkinin tersine dönerek emisyonları azalttığını göstermektedir. Bu sonuç, Çevresel Kuznets Eğrisi (ÇKE) hipotezinin G-7 ülkeleri için geçerliliğini desteklemektedir. Ayrıca, yenilenebilir enerji tüketimi ve Ar-Ge harcamalarının karbon emisyonlarını azaltıcı yönde etkide bulunduğu tespit edilmiştir.

Özgünlük: G-7 ülkeleri hem ekonomik büyüklükleri hem de Ar-Ge yatırımları bakımından küresel ölçekte öncü konumda yer almaktadır. Bu ülkelerin çevre üzerindeki etkilerinin kapsamlı ve güncel verilerle analiz edilmesi, yalnızca akademik literatüre katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda politika yapıcılar için pratik ve uygulanabilir öneriler sunma potansiyeli taşımaktadır. Dolayısıyla bu çalışma, G-7 ülkeleri özelinde yenilenebilir enerji, sürdürülebilir büyüme, teknoloji ve çevre kalitesi arasındaki ilişkileri inceleyerek literatüre özgün bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir Büyüme, Yenilenebilir Enerji, Ar-Ge Harcamaları, Çevre Kalitesi, G-7 Ülkeleri, CS-ARDL Analizi.

JEL Kodları: C33, E02, O13.

Environmental Quality in the Context of Technology, Renewable Energy, and Sustainable Growth: CS-ARDL Analysis**ABSTRACT**

Purpose: This study aims to analyse the effects of renewable energy, sustainable growth, and research and development (R&D) expenditures on environmental quality in G-7 countries in the period 1990-2022.

Methodology: The study analyses the effects of renewable energy, sustainable growth, and R&D expenditures on environmental quality using the panel CS-ARDL method.

Findings: DH cointegration test results confirm that there is a long-run cointegration relationship between carbon emissions and the variables analysed. The findings of the CS-ARDL analysis show that economic growth initially increases carbon emissions, but after a certain income level, this effect reverses and reduces emissions. This result supports the validity of the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis for G-7 countries. Moreover, it is found that renewable energy consumption and R&D expenditures have a decreasing effect on carbon emissions.

Originality: G-7 countries are in a leading position on a global scale in terms of both economic size and R&D investments. Analysing the environmental impacts of these countries with comprehensive and up-to-date data not only contributes to the academic literature but also has the potential to provide practical and applicable recommendations for policymakers. Therefore, this study aims to make an original contribution to the literature by analysing the relationships between renewable energy, sustainable growth, technology, and environmental quality in G-7 countries.

Keywords: Sustainable Growth, Renewable Energy, R&D Expenditures, Environmental Quality, G-7 Countries, CS-ARDL Analysis.

JEL Codes: C33, E02, O13.

¹ Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Refahiye Meslek Yüksekokulu, Büro Hizmetleri ve Sekreterlik Bölümü, Erzincan, Türkiye

² Kırıkkale Üniversitesi, Keskin Meslek Yüksekokulu, Muhasebe ve Vergi Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

³ Selçuk Üniversitesi, Kadınhanı Faik İçil Meslek Yüksekokulu, Yönetim ve Organizasyon Bölümü, Konya, Türkiye

Sorumlu Yazar-Corresponding Author: Fatih Akın, fatih.akin@erzincan.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1718994

Araştırma Makalesi / Research Article | Geliş / Submitted: 13.06.2025 | Kabul / Accepted: 10.11.2025

Atıf/Cite: Akın, F., Dinçer, S. ve Şakalak, A. (2026). "Teknoloji, Yenilenebilir Enerji ve Sürdürülebilir Büyüme Ekseninde Çevre Kalitesi: CS-ARDL Analizi", *Verimlilik Dergisi*, 60(1), 179-196.

EXTENDED ABSTRACT

One of the global challenges of the world economy, the scarcity of reserves, has led to an increased emphasis on sustainable development, sustainable growth, and environmental awareness. The implementation of this approach is closely linked to the reduction of carbon emissions and the increase in investments in renewable energy sources. In this context, technological advancements have become a fundamental component of this process. Particularly, innovation-driven developments support environmentally friendly production processes and growth, contributing to the preservation of natural resources. Therefore, growth achieved through renewable energy sources in conjunction with innovative research is seen as a significant factor in the understanding of a sustainable environment.

The growing global environmental issues highlight the importance of renewable energy sources. These sources, which gain efficiency and effectiveness through R&D expenditures, indirectly support the process of sustainable growth and a sustainable environment. Thus, R&D expenditures on renewable energy sources play a critical role in growth processes aimed at reducing carbon emissions. At this point, the G-7 countries lead the way by making substantial investments in renewable energy through expenditures on various technological innovations. With their technological investments, the G-7 countries serve as an example to all societies. By focusing on renewable energy sources and investing in R&D, these countries reduce carbon emissions and lead the process of sustainable growth. These developments, which go beyond the traditional growth model, create a positive cycle that supports the reduction in fossil fuel usage.

In this study, the effects of renewable energy, sustainable growth, and research and development (R&D) expenditures on environmental quality in G-7 countries during the 1990–2022 period are examined using the panel CS-ARDL method. Initially, cross-sectional dependence and homogeneity tests were conducted for the model series. The test findings indicate significant cross-sectional dependence among the variables and reveal that the variables have a heterogeneous structure. Due to the presence of cross-sectional dependence and heterogeneity among the variables, the analysis continued with the application of the CIPS unit root test, one of the second-generation unit root tests. The CIPS unit root test results show that the CO₂, GDP, GDP², and R&D variables are stationary at their first differences, while the REN variable is stationary at its level. In the next stage, the results of the DH cointegration test indicate the existence of a long-term cointegration relationship among the variables.

The findings from the CS-ARDL analysis indicate that economic growth initially has an increasing effect on carbon emissions, but then decreases after a certain threshold. This demonstrates that the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis is valid for the G-7 countries. Furthermore, renewable energy and R&D expenditures are found to have a reducing effect on carbon emissions. This finding suggests that technological advances and investments in clean energy support environmental sustainability. The CS-ARDL results are also supported by the findings from the panel FMOLS and DOLS estimators. The results are consistent with the studies conducted by Zheng et al. (2021) and Mentel et al. (2022). Zheng et al. (2021) found that renewable energy curbs carbon intensity in China, while Mentel et al. (2022) emphasized that R&D expenditures and renewable energy play a critical role in the spread of environmentally friendly production techniques in 26 economies. Therefore, the findings of this study support the long-term and lasting impact of renewable energy and technological advancements on improving environmental quality and reducing carbon emissions. The overall assessment of the study reveals that, specifically for the G-7 countries, technology- and renewable energy-focused policies support long-term economic stability by reducing environmental degradation. Increasing renewable energy use, reducing greenhouse gas emissions, and expanding energy efficiency policies stand out as key determinants of protecting environmental quality. Therefore, investments in technology, renewable energy, and R&D must be integrated with environmental policies to ensure sustainable growth.

1. GİRİŞ

Son yıllarda artan insan faaliyetleri, çevresel kaliteyi önemli ölçüde etkilemiştir (Khan ve diğerleri, 2022). Fosil yakıtların yanmasıyla ortaya çıkan sera gazı salımları, küresel ısınma, iklim değişikliği, deniz seviyesinin yükselmesi ile su ve toprak kirliliği gibi çeşitli çevresel sorunlara yol açmaktadır (He ve diğerleri, 2021). Bu sorunlar sonucunda dünyanın fiziksel ve beşerî coğrafyasında değişimler meydana gelmekte ve bu da insan yaşamı üzerinde çeşitli etkiler yaratmaktadır (Stern, 2008). Öte yandan, küresel ekonomik büyümeyi sürdürmek ve artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak için üretim ve tüketimin devamlılığı önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, sürekli artan enerji talebi ve enerjinin üretim sürecindeki kritik rolü, enerji ile çevre kalitesi arasındaki ilişkinin önemini ortaya koymaktadır.

Enerji tüketiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının çevreye verdiği zarar her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, Sanayi Devrimi sonrasında artan çevresel sorunlarla paralel olarak, hükümetler ve politika yapıcılar çevresel kaliteyi artırmaya yönelik konuları öncelikli hâle getirmeye başlamıştır (Murshed ve diğerleri, 2021). Bu bağlamda, 1972 yılında düzenlenen Birleşmiş Milletler Stockholm Çevre ve Kalkınma Konferansı, çevresel sorunların küresel düzeyde gündeme taşınmasında önemli bir dönüm noktası olmuştur. 1983 yılında ise bu kaygıları ele almak üzere Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) kurulmuştur. İzleyen yıllarda, 1992 Rio Konferansı ve 1997 Kyoto Protokolü gibi çeşitli uluslararası konferanslar çevresel zorlukları ve gerekli politika önlemlerini küresel gündemin merkezine yerleştirmiştir (Nordhaus, 2010; Brenton, 2013). Zamanla fosil yakıt tüketiminin ciddi boyutlara ulaşması, ülkelerin küresel ölçekte bu tüketimi azaltmaya yönelik girişimlerde bulunmalarına yol açmıştır. Harekete geçen ülkeler, 2030 yılına kadar ulaşmayı hedefledikleri amaçları Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) çerçevesine dâhil etmiştir (Roser, 2021).

Bu bağlamda, enerji kullanımı ve sanayi faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonları, farklı yakıt türlerinin tüketimine dayanmaktadır ve fosil yakıtlar hâlen enerji talebinin önemli bir kısmını karşılamaktadır (Ritchie ve diğerleri, 2020; Shen ve diğerleri, 2023). Özellikle Sanayi Devrimi ile kömür ve petrol gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında önemli artışlar yaşanmıştır. Bu eğilimler, sanayi üretiminin hızla genişlemesiyle günümüze kadar devam etmiştir. Sanayi Devrimi ile kömür tüketimi artmış, ardından 20. yüzyılda petrol, doğalgaz ve hidroelektrik enerji kullanımı yaygınlaşmıştır (Ritchie ve Rosado, 2020). Bugün hâlâ dünya genelinde birçok bölgede karbon emisyonları hızla artış göstermektedir. Bu nedenle, çevresel sorunların başlıca nedenlerinden biri olan bu emisyonların nedenlerine odaklanmak ve alternatif enerji kaynaklarını incelemek, enerji ekonomisi alanının hızla gelişmesine neden olmuştur.

Günümüzde çevresel sorunlara ve bu sorunların neden olduğu olumsuz değişimlere çözüm bulmak, akademik çevre ve politika yapıcılar için öncelikli bir konu hâline gelmiştir (Adebayo ve Kirikkaleli, 2021). Yapılan analizler doğrultusunda, araştırmacıların genellikle çevreyi etkileyen faktörlere odaklandığı görülmektedir. Son dönemde ise enerji, teknoloji ve büyüme gibi çevreyle daha yakından ilişkili konular ön plana çıkmıştır. Bu aşamada, Çevresel Kuznets Eğrisi (ÇKE) çevre araştırmalarında merkezi bir rol üstlenmektedir. İlk olarak Grossman ve Krueger (1991, 1995) tarafından geliştirilen ÇKE hipotezi, ekonomik büyümenin başlangıçta çevresel bozulmaya katkı sağladığını, ancak ekonomik kalkınmanın belirli bir düzeye ulaşmasının ardından çevresel koşulların iyileştiğini öne sürmektedir (Pata, 2018; Panayotou, 2000: 140; Murshed ve diğerleri, 2021). Bu hipoteze göre, kişi başına düşen gelir ile çeşitli kirlenici unsurlar arasında ters U şeklinde bir ilişki varsayılmaktadır (Stern, 2004).

Karbon emisyonlarının azaltılması, çevresel tahribatın azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması açısından en önemli unsurlardan biridir (Kelly, 2006). Enerji verimliliği sağlanarak daha az enerji tüketilmesi, küresel ölçekte çevresel kalitenin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır (Heryadi ve Hartono, 2016). Ayrıca, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim, ülkelerin temiz çevre ve iklim hedeflerine ulaşmasına da katkı sağlamaktadır (Wongsapai ve diğerleri, 2016). Bu bağlamda, sürdürülebilir çevre ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerini hızlandırmak için yeni kaynak arayışına alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek, küresel dönüşüm açısından büyük önem taşımaktadır.

Öte yandan, teknolojik değişimin toplumsal ve ekonomik faaliyetleri yönlendirerek çevresel kirlilik üzerinde etkili olabileceği değerlendirilmektedir (Jaffe ve diğerleri, 2003: 461). Bu çerçevede, birçok araştırmacı teknolojik yeniliklerin çevresel kaliteyi olumlu yönde etkileyeceği sonucuna varmıştır. Örneğin, Sohag ve diğerleri (2015), ekonomik büyümenin enerji kullanımını artıracaklarını, ancak teknolojik yeniliklerin enerji verimliliğini yükselterek çevresel kaliteyi artırabileceğini savunmuştur. Benzer şekilde, Bao ve Lin (2021), ekonomik büyümenin çevresel yıkımı artıracaklarını; ancak üretimde kullanılan teknolojik yeniliklerin bu yıkımı azaltabileceğini belirtmişlerdir. Nordhaus (2007) ise teknolojik yeniliklerin üretim verimliliğini artırarak ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanıma sunarak sürdürülebilir kalkınmayı teşvik ettiğini ifade etmektedir.

Ekonomi literatürü incelendiğinde, teknolojik yenilik kavramının kökeninin Schumpeter'e (1942) dayandığı ve teknolojik değişimin ekonomik büyüme sürecindeki rolünü ele alan birçok kaynağın bulunduğu görülmektedir. Schumpeter, teknolojik gelişimi inovasyon, icat ve yayılma aşamaları olarak değerlendirerek

modern büyüme teorisinin temellerini atmıştır (Khan ve diğerleri, 2022). Schumpeter'in teknolojik gelişmeye yönelik katkıları, günümüzün bilgi ve teknolojiye dayalı küresel ekonomik sistemi için belirleyici bir bakış açısı sunmaktadır (Ziemnowicz, 2020). Endojen büyüme modelinde ise beşerî sermaye ve teknolojik gelişim, büyümenin temel kaynakları olarak kabul edilmektedir. Bu modelde Ar-Ge harcamalarındaki artış, ekonomik üretimi ve kaynak kullanım verimliliğini artırmakta ve dolaylı yoldan çevre üzerinde de etkili olmaktadır (Romer, 1986; Lucas, 1988). Ancak çevresel bozulma, enerji tüketimi ve teknolojik ilerleme, kaynak dağılımı, sosyoekonomik yapı, politik işleyiş ve jeopolitik konum gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak da farklılık göstermektedir.

Diğer yandan, Endüstri 4.0 ve dijital teknolojiler, 18. yüzyılda başlayan ve 21. yüzyılda hız kazanan sanayileşmenin neden olduğu çevresel sorunlar ve iklim değişikliğiyle mücadele konusunda önemli fırsatlar sunmaktadır. Çünkü sanayi sektörü ve bu sektörde kullanılan yenilenemez enerji kaynakları, küresel karbon emisyonlarının başlıca kaynağını oluşturmaktadır (Shen ve diğerleri, 2023). Bu nedenle, teknolojik ilerlemeler çevre dostu temiz enerjinin sağlanmasını mümkün kılabilir (Ritchie ve diğerleri, 2020). Bu bilgiler ışığında, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleştirilmesinde dijital teknolojilerin Endüstri 4.0 ekseninde kullanılması, ülkelerin çevresel sürdürülebilirliğini sağlamada kilit rol oynamaktadır (Oláh ve diğerleri, 2020). Bu doğrultuda, sürdürülebilir çevre ve ekonomi alanında Endüstri 4.0 teknolojilerinin entegrasyonu ve yaygınlaştırılması için daha fazla Ar-Ge çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, teknolojik yenilikler ekonomik ilerlemeye katkı sağlarken, sanayi gelişimini teşvik ederek toplumların sürdürülebilir kalkınmasına da katkı sunmaktadır (Shen ve diğerleri, 2023). Ek olarak toplumlar için kıt olan kaynaklardan maksimum fayda sağlanması yüksek düzeyde verimlilik artışına da neden olmaktadır. Özellikle hızla artan nüfusun sınırsız ihtiyaç kalemlerine karşı mevcut kaynakların verimliliği teknolojik gelişmişlikle birlikte sürdürülebilirlik kazanmaktadır.

Bu noktada, hızlı ilerleme kaydeden G-7 ülkeleri, gerçekleştirdikleri teknolojik yatırımlarla tüm toplumlara örnek teşkil etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklanmaları ve Ar-Ge harcamaları sayesinde bu ülkeler, karbon emisyonlarını azaltmakta ve sürdürülebilir büyüme sürecine öncülük etmektedir. Geleneksel büyüme modelinin ötesinde gerçekleşen bu gelişmeler, fosil yakıt kullanımının azalması sürecini destekleyen olumlu bir döngü yaratmaktadır. Bu ilişkiler doğrultusunda, mevcut çalışma, sürdürülebilir kalkınmanın önemli bileşenlerini oluşturan sürdürülebilir büyüme, yenilenebilir enerji ve Ar-Ge harcamalarının çevresel kalite üzerindeki etkilerini G-7 ülkeleri özelinde ampirik bir analiz ile inceleyerek literatüre katkı sağlamaktadır. Giriş bölümünün ardından çalışmada önce konuya ilişkin literatür kapsamlı biçimde ele alınacaktır. Sonrasında araştırmada kullanılan yöntem ayrıntılarıyla açıklanacak ve devamında analiz sonuçları ile bulgular detaylı biçimde sunulacaktır. Sonuç bölümünde ise elde edilen bulgular değerlendirilecek ve bunlara dayalı politika önerilerine yer verilecektir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Dünya ekonomisinin küresel sorunlarından biri olan rezervlerin kıtlığı, sürdürülebilir kalkınma, sürdürülebilir büyüme ve çevre anlayışının önem kazanmasına neden olmuştur. Bu yaklaşımın hayata geçirilmesi, ülkelerdeki karbon emisyonlarının azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımların artırılmasıyla yakından ilişkilidir. Bu bağlamda, teknolojik gelişmeler de bu sürecin temel bir unsuru haline gelmiştir. Özellikle yenilik (inovasyon) odaklı gelişmeler, çevre dostu üretim süreçlerini ve büyümeyi desteklemekte ve doğal kaynakların korunmasına katkı sağlayabilmektedir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynakları ile yenilikçi araştırmalar eşliğinde gerçekleşen büyümenin, sürdürülebilir çevre anlayışında önemli faktörler olduğu görülmektedir.

Ancak, mevcut literatürde bu faktörlerin etkisine ilişkin görüş ayrılıkları bulunmaktadır. Örneğin, Tablo 1'de özetlendiği üzere, Adebayo ve Kirikkaleli (2021) ve Karimi Alavijeh ve diğerleri (2023), Ar-Ge harcamalarının bir göstergesi olan teknolojik yeniliğin karbon emisyonları üzerinde olumsuz bir etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır. Benzer şekilde, Zafar ve diğerleri (2021) ise teknolojik yeniliğin bu çevresel kaliteyi azalttığını göstermiştir. Ancak, Ibrahim ve diğerleri (2022) çevre teknolojisindeki gelişmelerin ve Hye ve diğerleri (2023) ise eko-inovasyon gibi yeniliklerin karbon emisyonlarını azalttığını ve bu sayede sürdürülebilir çevreye olumlu katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur. Aynı zamanda, Agyeman ve diğerleri (2023) teknolojik yeniliklerin uzun vadede çevre kirliliğini azaltmaya yardımcı olduğunu, Nguyen ve diğerleri (2020) ise teknolojik inovasyona yapılan harcamaların karbon emisyonlarını azalttığını tespit etmiştir.

Çin ve ABD'yi analiz eden Ulucak (2021), teknolojik yeniliğin Çin'de istatistiksel olarak anlamlı olmadığını, ancak ABD'de karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sağladığını ortaya koymuştur. Karbon emisyonlarını etkileyen bir diğer önemli faktör ise yenilenebilir enerji sektörüdür. Adebayo ve Kirikkaleli (2021), Ibrahim ve diğerleri (2022) ve Karimi Alavijeh ve diğerleri (2023) tarafından yapılan çalışmalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının karbon emisyonlarını azaltmaya yardımcı olduğunu göstermekte olup, bu sonuç, Hye ve diğerleri (2023) tarafından da desteklenmektedir. Ancak, Abbasi ve diğerleri (2021), Tayland

örneğinde yenilenebilir enerjinin kısa vadede olumsuz bir etkisi olduğunu tespit ederken, Nathaniel ve diğerleri (2021) bu değişkenin G-7 ülkelerinde önemsiz olduğunu belirlemiştir.

Tablo 1. Literatür özeti

<i>Yazar (lar)</i>	<i>Zaman</i>	<i>Ülke(ler)</i>	<i>Yöntem</i>	<i>Bulgular</i>
Fernández ve diğerleri (2018)	1990–2013	AB(15), ABD, Çin	Regresyon analizi	Ar-Ge harcamaları CO ₂ emisyonlarını azaltırken, enerji tüketimi artışı CO ₂ emisyonlarını artırmaktadır.
Nguyen ve diğerleri (2020)	2000–2014	G-20	OLS	Enerji fiyatları, DYY, teknoloji, inovasyon harcamaları ve dışa açıklık CO ₂ emisyonlarını azaltmaktadır.
Abbasi ve diğerleri (2021)	1980–2018	Tayland	ARDL, frekans-dönem nedensellik	Enerji tüketiminin çevresel bozulma üzerindeki etkisi kısa ve uzun vadede negatif ve anlamlıdır. Değişkenler arasında kısa, orta ve uzun vadeli nedensellik doğrulanmıştır.
Adebayo ve Kirikkaleli (2021)	1990–2015	Japonya	Wavelet istatistik yöntemleri	Küreselleşme, GSYH büyümesi ve teknolojik yenilik CO ₂ emisyonlarını artırırken, yenilenebilir enerji tüketimi kısa ve orta vadede azaltmaktadır.
Zheng ve diğerleri (2021)	2008–2017	Çin (İller)	Regresyon analizi	Yenilenebilir enerji CO ₂ emisyonlarını kısıtlamaktadır.
Ulucak (2021)	1980–2016	ABD, Çin	ARDL	Teknolojik yeniliğin CO ₂ emisyonları üzerindeki etkisi Çin'de anlamlı değilken, ABD'de CO ₂ emisyonlarını azaltmaktadır. Yenilenebilir enerji her iki ülkede de CO ₂ emisyonlarını azaltmaktadır.
Nathaniel ve diğerleri (2021)	1990–2017	G-7(İtalya hariç)	AMG, CCEMG	Nükleer enerji CO ₂ emisyonlarını azaltır, yenilenebilir enerji etkisizdir. ÇKE hipotezi geçerlidir.
Zafar ve diğerleri (2021)	1990–2018	APEC Ülkeleri	Panel kuantil	Biyokütle kullanımı, teknolojik yenilik ve büyüme çevresel kaliteyi olumsuz etkiler. Eğitim ve finansal gelişme CO ₂ emisyonlarını azaltır.
Mughal ve diğerleri (2022)	1990–2019	Güney Asya	FMOLS	Ekonomik büyümesi ile CO ₂ emisyonları arasında nedensellik tespit edilmiştir. Ekonomik büyüme ile enerji kullanımı arasında çift yönlü nedensellik bulunmaktadır.
Du ve diğerleri (2022)	1990–2018	MINT	FMOLS, DOLS, FE-OLS, MMQR	Ekonomik büyüme ve yüksek teknoloji CO ₂ emisyonlarını artırır, yenilenebilir enerji CO ₂ emisyonlarını azaltır.
Hassan ve diğerleri (2022)	1985–2018	Çin	ARDL	Nükleer enerji tüketimi ve yenilikçi teknoloji çevre kirliliğini azaltmaktadır.
Xu ve diğerleri (2022)	1986–2019	G-7	NARDL, 2SLS	Finansal gelişme ve yenilenebilir enerji üretiminin CO ₂ emisyonları üzerinde asimetric etkileri vardır.
Mentel ve diğerleri (2022)	1995–2015	26 Ülke	Panel eşbütünleşme testi, FMOLS, DH nedensellik	Ar-Ge harcamaları ve yenilenebilir enerji CO ₂ emisyonlarını negatif etkiler. Kişi başına düşen GSYH ve DYY pozitif etkiler. Değişkenler arasında uzun dönemli ilişki ve tek yönlü nedensellik vardır.
Chen (2022)	1990–2018	BRICS	ARDL	Brezilya, Hindistan ve Çin'de dijitalleşmenin CO ₂ üzerinde negatif ve anlamlı bir etkisi bulunmaktadır.
Agyeman ve diğerleri (2023)	2000–2020	27 Afrika Ülkesi	FMOLS, DOLS, PMG	Gelir artışı çevresel kirlenmeyi uzun vadede artırır. Teknolojik yenilik ve kentleşme uzun vadede çevre kirliliğini azaltır.
Zeng ve Yang (2023)	2010–2020	Çin (30 İl)	Mekanizma testi, heterojenlik analizi	Dijital teknoloji CO ₂ emisyonlarını azaltan olumlu bir etki meydana getirir.

Tablo 1. (Devamı)

Yazar (lar)	Zaman	Ülke(ler)	Yöntem	Bulgular
Karimi Alavijeh ve diğerleri (2023)	2000–2019	14 AB Ülkeleri	MMQR, FMOLS, DOLS, FE-OLS	Yenilenebilir enerji CO ₂ emisyonlarını azaltır. Teknolojik yenilik ve GSYH CO ₂ emisyonlarını artırsa da düşük kuantillerde çevresel iyileşmeye katkı sağlar.
Hye ve diğerleri (2023)	1995–2018	E7	FGLS, PCSE, MMQR	Eco-innovation, yenilenebilir enerji ve ekonomik risk CO ₂ emisyonlarını azaltır, küreselleşme ve GSYH artırır.
Hayat ve diğerleri (2023)	1990–2020	OECD	Kuantil regresyon	Yenilenebilir Ar-Ge teknolojisi yüksek kuantillerde CO ₂ emisyonlarını azaltır. İthalat ve büyüme kirliliği artırır, ihracat azaltır.
Huang ve diğerleri (2024)	2008–2019	Çin (30 Bölge)	Regresyon analizi	Dijital teknoloji yeşil teknolojiyi teşvik eder, sanayi yapısını geliştirir ve CO ₂ emisyonlarını azaltır.
Mahmood ve Tanveer (2024)	1995–2020	25 Batı Avrupa Ülkeleri	Çapraz bağımlılık	ÇKE Hipotezi geçerlidir. Yenilenebilir enerji teknolojileri CO ₂ 'yi azaltır. Patentler kısa vadede etkisiz, uzun vadede azaltıcıdır.
Fatima ve diğerleri (2024)	1990–2020	G-7	DOLS, FMOLS, CCR, MMQR	Teknolojik inovasyon CO ₂ emisyonlarını azaltır.
Altın (2024)	1971–2023	G-7	Panel VAR, DOLS	Enerji verimliliği, yenilenebilir enerji ve CO ₂ emisyonları arasında uzun dönemli eşbütünleşme ilişkisi vardır. Verimlilik artışı CO ₂ emisyonlarını azaltır. Yenilenebilir enerji ile CO ₂ emisyonları arasında pozitif ilişki vardır.
Zeraibi ve diğerleri (2024)	2004–2021	Çin (31 il)	CS-ARDL, AMG, DH	Ekonomik büyüme, kentleşme ve teknoloji pazar büyüklüğü SO ₂ emisyonlarını azaltır. Teknoloji pazarı ile SO ₂ arasında çift yönlü nedensellik vardır.

Ayrıca, çevresel kalite ile ekonomik büyüme arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi teorik olarak açıklayan ÇKE hipotezi hâlâ belirsizlik taşımaktadır. Adebayo ve Kirikkaleli (2021), Zafar ve diğerleri (2021), Khan ve diğerleri (2022) ve Agyeman ve diğerleri (2023) tarafından yapılan çalışmalar, ekonomik büyümenin genel olarak karbon emisyonlarını artırarak çevresel kaliteyi olumsuz etkilediğini ve çevresel bozulmayı hızlandırdığını ortaya koymaktadır. Çalışmalar arasında bulguların farklılık göstermesi nedeniyle, bu değişkenlerin güncel verilerle yeniden incelenmesi önemli hale gelmiştir.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada, 1990-2022 döneminde G-7 ülkelerinde yenilenebilir enerji, sürdürülebilir büyüme ve Ar-Ge harcamalarının çevre kalitesi üzerindeki etkisi CS-ARDL yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Analizler, değişkenlerin logaritmik dönüşümleri uygulanarak ve ekonometrik paket programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ampirik modeli, Fernández ve diğerleri (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmadan esinlenerek oluşturulmuş olup, Eşitlik 1'de verilmiştir.

$$CO2_{it} = \beta_0 + \beta_{i1}GDP_{it} + \beta_{i2}GDP_{it}^2 + \beta_{i3}REN_{it} + \beta_{i4}ARGE_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Değişkenlere ait açıklamalar, veri kaynakları ve tanımlayıcı istatistikler Tablo 2'de gösterilmiştir. CO₂ emisyonları, kişi başına metrik ton olarak ölçülmekte ve Dünya Bankası tarafından sağlanan verilerle temsil edilmektedir. Ekonomik büyüme, kişi başına düşen gelir (2015 sabit fiyatlarıyla) ölçülmekte ve yine Dünya Bankası verileri kullanılmaktadır. Ekonomik büyümenin karesi (GDP²) ise, ekonomik büyümenin çevresel etkilerini daha detaylı analiz edebilmek için yazarlar tarafından hesaplanmıştır. Yenilenebilir enerji tüketimi (REN), kişi başına düşen kilovat saat (kWh) eşdeğeri olarak ölçülmekte ve Uluslararası Enerji Ajansı tarafından sağlanan verilerle temsil edilmektedir. Ar-Ge harcamaları (AR-GE), gayri safi yurt içi hasılaya (GDP) oranı olarak ölçülmekte ve OECD verileri kullanılmaktadır. Bu değişkenler, ekonomik büyüme, yenilenebilir enerji kullanımı ve Ar-Ge harcamalarının CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini analiz etmek için kapsamlı bir veri seti sunmakta ve sürdürülebilir kalkınma politikalarının oluşturulmasında önemli bilgiler sağlamaktadır.

Tablo 2. Veri seti

Değişkenler	Açıklama	Kısaltmalar	Veri Kaynağı
CO ₂ Emisyonu	Kişi Başına Metrik Ton	CO ₂	Dünya Bankası (2024a)
Ekonomik Büyüme	Kişi Başına (2015 sabit ABD doları)	GDP	Dünya Bankası (2024b)
Ekonomik Büyümenin Karesi	Kişi Başına Karesi (2015 sabit ABD doları)	GDP ²	Yazarlar tarafından hesaplanmıştır
Yenilenebilir Enerji Tüketimi	Kişi Başına (kWh-equivalent)	REN	Uluslararası Enerji Ajansı (2024)
Ar-Ge Harcamaları	GDP'ye oranı (%GDP)	AR-GE	OECD (2024)

Ampirik çalışmanın ilk aşamasında, model serileri için yatay kesit bağımlılık (YKB) testi uygulanmıştır. YKB test sonuçlarına göre, birinci nesil veya ikinci nesil birim kök testlerinden hangisinin kullanılacağına karar verilmektedir. Bu çalışmada, Breusch-Pagan (1980) tarafından geliştirilen CD_{lm} testi, Pesaran (2004) tarafından geliştirilen CD_{lm} ile CD testi ve Pesaran ve diğerleri (2008) tarafından geliştirilen LM_{adj} testi dikkate alınmıştır. Bu testlerin denklemleri aşağıdaki gibidir (Eşitlik 2-5):

$$CD_{lm}(BP, 1980) = T \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (\hat{p}_{ij}^2) \rightarrow X^2 \frac{N(N-1)}{2} \quad (2)$$

$$CD_{lm}(Pesaran, 2004) = \sqrt{\left(\frac{1}{N(N-1)}\right)} T \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (T \hat{p}_{ij}^2 - 1) \xrightarrow{asy} N(0,1) \quad (3)$$

$$CD(Pesaran, 2004) = \sqrt{\left(\frac{2T}{N(N-1)}\right)} \left(\sum_{i=1}^{N-1} T \sum_{j=i+1}^N \hat{p}_{ij}^2\right) \xrightarrow{asy} N(0,1) \quad (4)$$

$$LM_{adj} = \left(\frac{2}{N(N-1)}\right)^{\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left[\hat{p}_{ij}^2 \left(\frac{T-K-\hat{p}_{ij}-\hat{\mu}_{Tij}}{v_{Tij}} \right) \right] \rightarrow N(0,1) \quad (5)$$

Verilen yatay kesit bağımlılık testlerinin hipotezleri ise aşağıdaki gibidir:

H_0 = Yatay kesit bağımlılığı yoktur.

H_1 = Yatay kesit bağımlılığı vardır.

Analizin ikinci aşamasında eğim homojenliği varsayımının kontrol edilmesi gerekmektedir. Değişkenlerin homojen ya da heterojen olması uygulanacak eşbütünleşme testlerinin şeklini belirlemektedir. Pesaran ve diğerleri (2008) tarafından geliştirilen $\tilde{A}$ ve $\tilde{A}_{adj}$ homojenlik testi kullanılmıştır. Bu testlere ait denklemler Eşitlik 6 ve Eşitlik 7'de gösterilmiştir.

$$\tilde{A} = \sqrt{N} \frac{N^{-1}\tilde{S}-k}{\sqrt{2k}} \quad (6)$$

$$\tilde{A}_{adj} = \sqrt{N} \frac{N^{-1}\tilde{S}-k}{var(t,k)} \quad (7)$$

Bu testlerin hipotezleri ise şu şekildedir:

H_0 : Eğim katsayıları homojendir.

H_1 : Eğim katsayıları heterojendir.

Değişkenlerin YKB ve heterojenlik içermesi nedeniyle analizin üçüncü aşamasında, ikinci nesil birim kök testlerinden olan CIPS birim kök testi, uygulanmıştır. Bu test, Pesaran (2007) tarafından geliştirilmiştir. CIPS testinin denklemi Eşitlik 8'de verilmiştir.

$$CIPS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CADF_i \quad (8)$$

Bu test istatistiğinin hipotezleri aşağıda yer almaktadır:

H_0 : Birim kök yoktur.

H_1 : Birim kök vardır.

Analizin dördüncü aşamasında, değişkenlerin yatay kesit bağımlılık ve heterojenlik özellik göstermesinden dolayı Westerlund (2008) DH (Durbin-Hausman) panel eşbütünleşme testi kullanılmıştır. DH şartlarından biri bağımlı değişken seviyede durağan olamayacağı, diğeri ise bağımsız değişkenlerin hem seviyede hem de birinci farkta durağan olmalarıdır. DH testinde iki istatistik yer almaktadır: Otoregresif parametrenin heterojen olduğu varsayımını ifade eden (DH_g) ve homojen olduğu varsayımını ifade eden (DH_p)'dir (Westerlund, 2008). (DH_g) ve (DH_p) test istatistiği Eşitlik 9 ve 10'da gösterilmiştir.

$$DH_g = \sum_{i=1}^n \hat{S}_i(\tilde{\phi}_i - \hat{\phi}_i)^2 \sum_{t=2}^T \hat{e}_{it-1}^2 \quad (9)$$

$$DH_p = \hat{S}_n(\tilde{\phi} - \hat{\phi})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{t=2}^T \hat{e}_{it-1}^2 \quad (10)$$

Bu testin hipotezleri aşağıdaki gibidir:

H_0 : Eşbütünleşme ilişkisi yoktur.

H_1 : Eşbütünleşme ilişkisi vardır.

Yatay kesit bağımlılığı mevcut olduğunda, birinci nesil panel ARDL en doğru tahminleri sağlamamaktadır. Bu doğrultuda analizin beşinci aşamasında yatay kesit bağımlılığı sorununu aşmak için CS-ARDL yöntemi kullanılmıştır. Chudik ve Pesaran'a (2015) göre, yatay kesit bağımlılığı sorunundan kaçınmak için her bir regresörün yatay kesit ortalamaları alınmalıdır (Eşitlik 11-13).

$$CO2_{i,t} = \sum_{j=1}^p \delta_{i,j} CO2_{i,t-j} + \sum_{j=0}^q \Omega_{i,j} X_{i,t-j} + \omega_i + \mu_{it} \quad (11)$$

$$CO2_{i,t} = \sum_{j=1}^p \delta_{i,j} CO2_{i,t-j} + \sum_{j=0}^q \Omega_{i,j} X_{i,t-j} + \sum_{j=0}^r \beta_{ij} I \bar{Z}_{t-1} + \omega_i + \mu_{i,t} \quad (12)$$

Burada $\bar{Z}_{t-1} = (\overline{CO2}_{i,t-j}, \bar{X}_{i,t-j})$ regresyon ve regresörün ortalamalarıdır, p, q, r her değişken için gecikmeleri gösterir. Ayrıca, $\bar{Z}$ yatay kesit bağımlılığından kaçınmak için yatay kesit ortalamalarını temsil eder (Azam ve diğerleri, 2022).

$$CO2_{i,t} = \sum_{j=1}^p \delta_{i,j} CO2_{i,t-j} + \sum_{j=0}^q \Omega_{i,j} X_{i,t-j} + \sum_{j=0}^r \beta_{ij} I \bar{Z}_{t-1} + \omega_i + \mu_{i,t} \quad (13)$$

CS-ARDL'nin kısa dönem katsayılarından uzun dönem katsayılarını tahmini Eşitlik 14'te şu şekilde verilmektedir;

$$\hat{\lambda}_{CS-ARDLij} = \frac{\sum_{j=0}^q \hat{\alpha}_{ij}}{1 - \sum_{j=1}^p \hat{\delta}_{ij}} \quad (14)$$

Ortalama grup Eşitlik 15'te verilmiştir.

$$\hat{\lambda}_{MG} = \sum_{j=1}^N \hat{\lambda}_{i,j} \quad (15)$$

Kısa dönem katsayısı şu şekilde tahmin edilir (Eşitlik 16-19).

$$\Delta CO2_{i,t} = \vartheta_i [CO2_{i,t-j} - \lambda_{i,j} X_{i,t-j}] - \sum_{j=1}^{p-1} \delta_{ij} \Delta CO2_{i,t-j} + \sum_{j=0}^q \Omega_{ij} \Delta X_{i,t-j} + \sum_{j=0}^r \beta_{ij} I \bar{Z}_{t-1} + \omega_i + \mu_{it} \quad (16)$$

$$\Delta I = t - (t - 1) \quad (17)$$

$$\hat{\tau}_{ij} = -[1 - \sum_{j=1}^p \hat{\delta}_{ij}] \quad (18)$$

$$\hat{\lambda}_{ij} = \frac{\sum_{j=0}^q \hat{\alpha}_{ij}}{\hat{\tau}_{ij}} \quad (19)$$

Analizin altıncı aşamasında, CS-ARDL sonuçlarını desteklemek için panel FMOLS ve DOLS tahmincileri kullanılmıştır. Uzun dönem eş-bütünleşme testi McCoskey ve Kao (1998) ve Phillips ve Moon (1999) tarafından geliştirilen FMOLS ve Kao ve Chiang (2001) tarafından geliştirilen Panel Dinamik Sıradan En Küçük Kareler (DOLS) yöntemleri kullanılarak oluşturulmuştur. Monte Carlo simülasyonları, DOLS koentegrasyon tahmininin daha az yanlı olduğunu ve küçük örneklemelerde FMOLS tahmincilerinden daha iyi örneklem özelliklerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Panel FMOLS tahmincisi aşağıda Eşitlik 20'de gösterilmektedir;

$$\hat{\beta}_{FMOLS} = \{ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (X_{it} - \bar{X}_i)(X_{it} - \bar{X}_i) \}^{-1} \{ \sum_{i=1}^N [\sum_{t=1}^T (X_{it} - \bar{X}_i)(\tilde{Y}_{it} - T \Delta \epsilon_\mu)] \} \quad (20)$$

Burada $\tilde{Y}_{it}$ içsellik korelasyon terimidir ve $T \Delta \epsilon_\mu$ seri korelasyon düzeltme terimidir. Dinamik sıradan en küçük kareler (DOLS) tahmincisi Eşitlik 21'deki gibi elde edilir.

$$\hat{\beta}_{DOLS} = \theta_i + \beta_i X_{it-1} + \sum_{j=p+1}^{p2} Z_{ij} \Delta X_{it+j} + U_{it} \quad (21)$$

Burada p_2 maksimum vektör uzunluğu ve p_1 maksimum gecikme uzunluğu ve ΔX_{it+j} 'nin içselliğinin etkisini X_{it} ve U_{it} ortadan kaldırır.

4. BULGULAR

Bu bölümde gerçekleştirilen ampirik analizin bulgularına yer verilecektir. Tablo 3'te değişkenlere ait tanımlayıcı istatistikler yer almaktadır. CO₂ emisyonları, ortalama 2,309 birim ile düşük varyasyon göstermektedir. Standart sapma 0,415 ile gözlemlerin çoğunun ortalama etrafında yoğunlaştığını göstermektedir. GDP, ortalama 10,527 ile yüksek bir ekonomik performansı işaret ederken, standart sapma 0,189 ile ekonomik istikrarı vurgulamaktadır. GDP² ortalama 110,853 ve standart sapma 4,003 ile ekonomik büyüklüğün daha geniş bir yelpazede değerlendirildiğini göstermektedir. Yenilenebilir enerji kullanımı, ortalama 8,290 ve standart sapma 1,119 ile bölgeler arasında değişiklik göstererek bazı bölgelerde daha yaygın olduğunu ortaya koymaktadır. AR-GE harcamaları ise ortalama 2,190 ve standart sapma 0,651 ile yenilik ve gelişime verilen önemi göstermektedir. Minimum 0,930 ve maksimum 3,590 değerleri ile bazı bölgelerde AR-GE'ye daha fazla yatırım yapıldığını belirtmektedir.

Tablo 3. Tanımlayıcı istatistikler

Değişken	Gözlem Sayısı	Ortalama	Standart Sapma	Min.	Max.
CO ₂	231	2,309	0,415	1,448	3,061
GDP	231	10,527	0,189	10,226	11,072
GDP ²	231	110,853	4,003	104,581	122,588
REN	231	8,290	1,119	5,608	10,498
AR-GE	231	2,190	0,651	0,930	3,590

Tablo 4'te sunulan yatay kesit bağımlılık testi bulguları, çeşitli değişkenler için yapılan analizlerin sonuçlarını göstermektedir. CO₂, GDP, GDP², REN, AR-GE değişkenleri ve MODEL için yapılan CD_{lm} (BP, 1980), CD_{lm} (Pesaran, 2004), CD (Pesaran, 2004) ve LM_{adj} (Pesaran ve diğerleri, 2008) testlerinin tümü, yatay kesit bağımlılık hipotezini güçlü bir şekilde desteklemektedir. Tüm test sonuçları, %1 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,01$). Bu bulgular, incelenen değişkenler arasında önemli bir yatay kesit bağımlılığı olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, modelin geçerliliğini ve güvenilirliğini artırarak analiz edilen değişkenler arasındaki ilişkilerin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, yatay kesit bağımlılığının göz ardı edilmemesi, ekonometrik modellemelerde daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

Tablo 4. Yatay kesit bağımlılık testi bulguları

CSD Test	CD _{lm} (BP, 1980)	CD _{lm} (Pesaran, 2004)	CD (Pesaran, 2004)	LM _{adj} (Pesaran ve diğerleri, 2008)
CO ₂	68,375 (0,000) ***	7,310 (0,000) ***	-3,778 (0,000) ***	6,936 (0,000) ***
GDP	50,905 (0,000) ***	4,614 (0,000) ***	-3,183 (0,000) ***	3,603 (0,000) ***
GDP ²	50,554 (0,000) ***	4,560 (0,000) ***	-3,205 (0,000) ***	3,540 (0,000) ***
REN	66,471 (0,000) ***	7,016 (0,000) ***	-3,724 (0,000) ***	4,540 (0,000) ***
AR-GE	52,705 (0,000) ***	4,892 (0,000) ***	-2,973 (0,000) ***	29,276 (0,000) ***
MODEL	498,896 (0,000) ***	73,741 (0,000) ***	22,135 (0,000) ***	63,074 (0,000) ***

Not: *** $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,1$

Tablo 5'te sunulan homojenlik testi bulguları, modeldeki parametrelerin homojen olup olmadığını değerlendirmektedir. $\tilde{A}$ ve $\tilde{A}_{adj}$ test istatistikleri sırasıyla 12,574 ve 1,901 olarak bulunmuştur. Her iki test de %1 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlıdır ($p < 0,01$). Bu sonuçlar, modeldeki parametrelerin homojen olmadığını ve farklı gruplar arasında önemli farklılıklar olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, modelin geçerliliğini sağlamak için bu heterojenliğin dikkate alınması gerekmektedir.

Tablo 5. Homojenlik testi bulguları

Homojenlik Testleri	Test istatistiği	Olasılık
$\tilde{A}$	12,574	(0,000) ***
$\tilde{A}_{adj}$	13,901	(0,000) ***

Not: *** $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,1$

Tablo 6'da sunulan CIPS birim kök testi bulguları, çeşitli değişkenlerin durağanlık özelliklerini incelemektedir. CO₂, GDP, GDP² ve AR-GE değişkenleri için seviye değerleri sırasıyla -2,225, -2,095, -2,069 ve -1,761 olup, bu değerler kritik değerlerin üzerinde kalmaktadır. Bu durum, bu değişkenlerin seviye değerlerinde birim kök içerdiğini ve durağan olmadığını göstermektedir. Ancak, bu değişkenlerin birinci farkları alındığında, test istatistikleri sırasıyla -4,351, -3,870, -3,847 ve -3,506 olarak bulunmuş ve %1

anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlıdır ($p < 0.01$). Bu sonuçlar, CO_2 , GDP, GDP^2 ve AR-GE değişkenlerinin birinci farklarında durağan olduğunu ve $I(1)$ sürecinde olduklarını göstermektedir. Diğer yandan, REN değişkeni için seviye değeri -3,148 olup, bu değer %1 anlamlılık düzeyinde kritik değerin altında kalmaktadır. Bu durum, REN değişkeninin seviye değerinde durağan olduğunu ve $I(0)$ sürecinde olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, analiz edilen değişkenlerin çoğunluğunun birim kök içerdiğini ve birinci farklarında durağan hale geldiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, modelleme ve analiz süreçlerinde bu durağanlık özelliklerinin dikkate alınması, daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

Tablo 6. CIPS birim kök testi bulguları

Değişkenler	Seviye	Birinci Fark	Sonuç
CO_2	-2,225	-4,351***	$I(1)$
GDP	-2,095	-3,870***	$I(1)$
GDP^2	-2,069	-3,847***	$I(1)$
REN	-3,148***	----	$I(0)$
AR-GE	-1,761	-3,506***	$I(1)$
Kritik Değerler	%1	%5	%10
	(3,06)***	(-2,84)**	(-2,73)*

Not: *** $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,1$

Tablo 7’de sunulan DH eşbütünlüşme testi sonuçları, CO_2 değişkeninin GDP, GDP^2 , REN ve AR-GE değişkenleri ile uzun dönemli bir ilişkiye sahip olup olmadığını değerlendirmektedir. DH-grup ve DH-panel test istatistikleri sırasıyla -2,087 ve -1,599 olarak bulunmuş ve her iki test de belirli anlamlılık düzeylerinde istatistiksel olarak anlamlıdır. DH-grup testi, %5 anlamlılık düzeyinde ($p < 0,05$) istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu, CO_2 ile diğer değişkenler arasında uzun dönemli bir eşbütünlüşme ilişkisinin varlığını göstermektedir. DH-panel testi ise %10 anlamlılık düzeyinde ($p < 0,1$) istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu sonuç benzer şekilde uzun dönemli bir ilişkiyi desteklemektedir. Bu bulgular, CO_2 emisyonlarının ekonomik büyüme (GDP ve GDP^2), yenilenebilir enerji kullanımı (REN) ve araştırma-geliştirme harcamaları (AR-GE) ile uzun vadede birlikte hareket ettiğini göstermektedir. Elde edilen eşbütünlüşme ilişkisi, bu değişkenler arasındaki dinamiklerin daha derinlemesine incelenmesi gerektiğini ve uzun vadeli stratejilerin bu ilişkiler doğrultusunda şekillendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Tablo 7. DH eşbütünlüşme test sonuçları

DH Testi	DH-grup	DH-panel
$CO_2 = f(GDP, GDP^2, REN, AR-GE)$	-2,087 (0,018)**	-1,599 (0,055)*

Not: *** $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,1$

Tablo 8’de sunulan CS-ARDL kısa dönem tahmin sonuçlarına göre, CO_2 emisyonları üzerinde en belirgin etkiye sahip değişkenler arasında bir önceki dönemin CO_2 değişimi (ΔCO_{2t-1}) ve GDP yer almaktadır. GDP’nin katsayısı ise 35,553 olup, ekonomik büyümenin CO_2 emisyonlarını artırıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir ve bu etki %5 anlamlılık düzeyinde anlamlıdır ($p < 0,05$). GDP^2 ’nin katsayısı -1,687 olup, ekonomik büyümenin belirli bir seviyeden sonra CO_2 emisyonlarını azaltıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir ve bu etki %5 anlamlılık düzeyinde anlamlıdır ($p < 0,05$). AR-GE’nin katsayısı -0,099 olup, AR-GE harcamalarının CO_2 emisyonlarını azaltıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu etki %1 anlamlılık düzeyinde anlamlıdır ($p < 0,01$). REN değişkeni ise kısa dönemde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip değildir.

Uzun dönem tahmin sonuçlarına göre, GDP’nin katsayısı 22,446 olup, ekonomik büyümenin uzun dönemde CO_2 emisyonlarını artırıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu etki %1 anlamlılık düzeyinde anlamlıdır ($p < 0,01$). GDP^2 ’nin katsayısı -1,066 olup, ekonomik büyümenin belirli bir seviyeden sonra CO_2 emisyonlarını azaltıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu etki %1 anlamlılık düzeyinde anlamlıdır ($p < 0,01$). REN değişkeni uzun dönemde de CO_2 emisyonlarını azaltıcı bir etkiye sahip olup bu etki %5 anlamlılık düzeyinde anlamlıdır ($p < 0,05$). AR-GE’nin katsayısı -0,061 olup, AR-GE harcamalarının uzun dönemde CO_2 emisyonlarını azaltıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu etki %1 anlamlılık düzeyinde anlamlıdır ($p < 0,01$).

Genel olarak hem kısa hem de uzun dönemde ekonomik büyümenin CO_2 emisyonları üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Ancak, ekonomik büyümenin belirli bir seviyeden sonra CO_2 emisyonlarını azaltıcı bir etkisi olduğu da dikkate alınmalıdır. Ayrıca, AR-GE harcamaları ve yenilenebilir enerji kullanımı, CO_2 emisyonlarını azaltmada önemli rol oynamaktadır. Bu bulgular, sürdürülebilir kalkınma politikalarının oluşturulmasında ekonomik büyüme, yenilenebilir enerji ve AR-GE yatırımlarının dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, bu sonuçlar ÇKE hipotezinin geçerliliğini de desteklemektedir. Yani, ekonomik büyüme başlangıçta çevresel bozulmaya yol açsa da belirli bir gelir seviyesinden sonra çevresel

kalite iyileşmeye başlamaktadır. Bu, ekonomik büyümenin çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için bir araç olabileceğini ortaya koymaktadır.

Tablo 8. CS-ARDL kısa ve uzun dönem tahmin sonuçları

<i>Model: $CO_2=f(GDP, GDP^2, REN, AR-GE)$</i>				
<i>Panel (a): Kısa Dönem Tahmin Sonuçları</i>				
<i>Değişkenler</i>	<i>Katsayı</i>	<i>Standart Hata</i>	<i>t-istatistiği</i>	<i>P-value</i>
ΔCO_{2t-1}	-0,637	0,080	-7,88	0,000***
ΔGDP	35,553	13,825	2,57	0,010**
ΔGDP^2	-1,687	0,663	-2,54	0,011**
ΔREN	-0,045	0,029	-1,54	0,123
$\Delta AR-GE$	-0,099	0,035	-2,81	0,005***
<i>Panel (b): Uzun Dönem Tahmin Sonuçları</i>				
<i>Değişkenler</i>	<i>Katsayı</i>	<i>Standart Hata</i>	<i>t-istatistiği</i>	<i>P-value</i>
GDP	22,446	8,447	2,66	0,008***
GDP^2	-1,066	0,405	-2,63	0,009***
REN	-0,026	0,017	-1,51	0,013**
AR-GE	-0,061	0,021	-2,92	0,003***

Not: *** p<0,01; ** p<0,05; * p<0,1

Panel FMOLS sonuçlarına göre, GDP'nin CO₂ emisyonları üzerinde pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğu görülmektedir (katsayı: 40,270, p<0,01). Bu, ekonomik büyümenin CO₂ emisyonlarını artırdığını göstermektedir. GDP²'nin katsayısı -1,932 olup, bu değişkenin negatif ve istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi vardır (p<0,01). Bu, ekonomik büyümenin belirli bir seviyeden sonra CO₂ emisyonlarını azalttığını ve ÇKE hipotezini desteklediğini göstermektedir. REN değişkeni, CO₂ emisyonlarını azaltıcı bir etkiye sahiptir (katsayı: -0,139, p<0,05). AR-GE harcamaları da CO₂ emisyonlarını azaltıcı bir etkiye sahiptir (katsayı: -0,090, p<0,05).

Panel DOLS sonuçlarına göre, GDP'nin CO₂ emisyonları üzerinde pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğu görülmektedir (katsayı: 17,126, p<0,01). GDP²'nin katsayısı -0,809 olup, bu değişkenin negatif ve istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi vardır (p<0,01). Bu sonuçlar da ÇKE hipotezini desteklemektedir. REN değişkeni, CO₂ emisyonlarını azaltıcı bir etkiye sahiptir (katsayı: -0,275, p<0,01). AR-GE değişkeni de CO₂ emisyonlarını azaltıcı bir etkiye sahiptir (katsayı: -0,217, p<0,01).

Tablo 9. Panel FMOLS ve DOLS tahmin sonuçları

<i>Model: $CO_2=f(GDP, GDP^2, REN, AR-GE)$</i>				
<i>Panel FMOLS Sonuçları</i>		<i>Panel FMOLS Sonuçları</i>		
<i>Değişkenler</i>	<i>Katsayı</i>	<i>Standart Hata</i>	<i>t-istatistiği</i>	<i>P-value</i>
GDP	40,270	12,752	3,158	0,002***
GDP^2	-1,932	0,613	-3,153	0,002***
REN	-0,139	0,054	-2,566	0,011**
AR-GE	-0,090	0,041	-2,180	0,030**
<i>Panel DOLS Sonuçları</i>				
<i>Değişkenler</i>	<i>Katsayı</i>	<i>Standart Hata</i>	<i>t-istatistiği</i>	<i>P-value</i>
GDP	17,126	3,542	4,835	0,000***
GDP^2	-0,809	0,166	-4,865	0,000***
REN	-0,275	0,044	-6,306	0,000***
AR-GE	-0,217	0,062	-3,500	0,001***

Not: *** p<0,01; ** p<0,05; * p<0,1

Hem Panel FMOLS hem de Panel DOLS sonuçları, ekonomik büyümenin CO₂ emisyonları üzerinde başlangıçta artırıcı, ancak belirli bir seviyeden sonra azaltıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, ÇKE hipotezinin geçerliliğini desteklemektedir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kullanımı ve Ar-Ge harcamalarının CO₂ emisyonlarını azaltmada önemli rol oynadığı görülmektedir. Bu sonuçlar, CS-ARDL modelinden elde edilen bulgularla uyumludur ve sürdürülebilir kalkınma ve çevre politikalarının oluşturulmasında ekonomik büyüme, yenilenebilir enerji ve AR-GE yatırımlarının dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

5.SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Küresel perspektifte artan çevre sorunları, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini açıkça ortaya koymaktadır. Ar-Ge harcamaları sayesinde etkinlik ve verimlilik kazanan bu kaynaklar, dolaylı olarak sürdürülebilir büyüme ve sürdürülebilir çevre sürecini de desteklemektedir. Bu bağlamda, karbon

emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayacak büyüme süreçlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik Ar-Ge harcamalarının kritik bir rol üstlendiği görülmektedir. Bu noktada lider konumda bulunan G-7 ülkeleri, çeşitli teknolojik yeniliklere yönelik harcamalarla yenilenebilir enerji kaynaklarına büyük yatırımlar gerçekleştirmektedir. Bu çalışmada, teknolojik gelişme ve ekonomik büyüme potansiyeli açısından dünyanın önde gelen ekonomilerinden oluşan G-7 ülkelerinde, 1990-2022 döneminde yenilenebilir enerji, sürdürülebilir büyüme ve Ar-Ge harcamalarının çevre kalitesi üzerindeki etkisi CS-ARDL yöntemiyle incelenmiştir. Özellikle teknolojik gelişme ve yenilenebilir enerjinin çevre üzerindeki dönüştürücü rolü vurgulanmıştır.

Öncelikle çalışmada, model serileri için yatay kesit bağımlılık ve homojenlik testleri gerçekleştirilmiştir. Test bulguları, değişkenler arasında anlamlı bir yatay kesit bağımlılığı bulunduğunu ve değişkenlerin heterojen bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Değişkenlerin yatay kesit bağımlılık ve heterojenlik içermesi nedeniyle analiz, ikinci nesil birim kök testlerinden olan CIPS birim kök testinin uygulanmasıyla sürdürülmüştür. CIPS birim kök testi sonuçları, CO₂, GDP, GDP² ve Ar-Ge değişkenlerinin birinci farklarında durağan olduğunu; REN değişkeninin ise seviye değerinde durağan olduğunu göstermektedir. Bir sonraki aşamada gerçekleştirilen DH eşbütünleşme testi sonuçları, değişkenler arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisinin varlığını ortaya koymaktadır.

CS-ARDL analizinden elde edilen bulgular, ekonomik büyümenin karbon emisyonları üzerinde başlangıçta artırıcı, ancak belirli bir eşiğin ardından azaltıcı bir etki yarattığını göstermektedir. Bu durum, Çevresel Kuznets Eğrisi (ÇKE) hipotezinin G-7 ülkeleri için geçerli olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, yenilenebilir enerji ile Ar-Ge harcamalarının karbon emisyonlarını azaltıcı yönde etkide bulunduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, teknolojik ilerlemelerin ve temiz enerjiye yönelik yatırımların çevresel sürdürülebilirliği desteklediğini göstermektedir. CS-ARDL sonuçları, panel FMOLS ve DOLS tahmincilerinden elde edilen bulgularla da desteklenmektedir. Elde edilen sonuçlar, Zheng ve diğerleri (2021) ile Mentel ve diğerleri (2022) tarafından yapılan çalışmalarla uyumluluk göstermektedir. Zheng ve diğerleri (2021), Çin'de yenilenebilir enerjinin karbon yoğunluğunu engellediğini; Mentel ve diğerleri (2022) ise 26 ekonomide Ar-Ge harcamaları ve yenilenebilir enerjinin çevre dostu üretim tekniklerinin yaygınlaşmasında kritik bir rol oynadığını vurgulamaktadır. Dolayısıyla bu çalışmanın bulguları, yenilenebilir enerji ve teknolojik gelişmelerin çevre kalitesini artırmada ve karbon emisyonlarını azaltmada uzun vadeli ve kalıcı etkiler oluşturduğunu desteklemektedir.

Çalışmanın genel değerlendirmesi, G-7 ülkeleri özelinde teknoloji ve yenilenebilir enerji odaklı politikaların çevresel bozulmayı azaltarak uzun vadeli ekonomik istikrarı desteklediğini ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerji kullanımının artışı, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve enerji verimliliği politikalarının yaygınlaştırılması, çevre kalitesinin korunmasında temel belirleyiciler olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilir büyümenin sağlanabilmesi için teknoloji, yenilenebilir enerji ve Ar-Ge yatırımlarının çevre politikalarıyla bütünleşik biçimde ele alınması gerekmektedir. Öncelikle, ekonomik büyümenin çevresel tahribatını azaltmak amacıyla karbon yoğun sektörlerde yeşil dönüşüm süreci hızlandırılmalı ve enerji verimliliğini artıran teknolojik yenilikler desteklenmelidir. Yenilenebilir enerji yatırımlarına yönelik finansal teşvikler güçlendirilmeli; fosil yakıtlara verilen sübvansiyonlar ise kademeli olarak azaltılmalıdır. Ancak bu süreçte, gelişmekte olan ülkelerde finansal kaynak yetersizliği, teknolojik bağımlılık ve altyapı eksikliği gibi sorunlar, sürdürülebilir büyüme hedeflerinin önünde ciddi engeller oluşturmaktadır. Bu nedenle, uluslararası iş birlikleri, teknoloji transferi anlaşmaları ve yeşil finansman mekanizmalarının etkinleştirilmesi, küresel düzeyde çevre kalitesinin iyileştirilmesi açısından önem taşımaktadır. Gelecekteki çalışmalar, yenilenebilir enerji ve dijital teknolojilerin sürdürülebilir büyüme ekseninde çevre kalitesine etkilerini farklı ülkeler ve sektörler bazında karşılaştırmalı olarak inceleyebilir.

Yazar Katkıları /Author Contributions

Fatih Akın: Metodoloji, Analiz, Makale Yazımı-rijinal taslak, Selin Dinçer: Kavramsallaştırma, Veri Derleme, Modelleme, Makale Yazımı-rijinal taslak, Ayşenur Şakalak: Literatür taraması, Makale Yazımı-inceleme ve düzenleme

Fatih Akın: Methodology, Analysis, Article Writing-original draft, Selin Dinçer: Conceptualisation, Data Collection, Modelling, Article Writing-original draft, Ayşenur Şakalak: Literature review, Manuscript writing-review and editing

Çatışma Beyanı /Conflict of Interest

Yazar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No potential conflict of interest was declared by the author.

Fon Desteği / Funding

Bu çalışmada herhangi bir resmi, ticari ya da kâr amacı gütmeyen organizasyondan fon desteği alınmamıştır.

Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Etik Standartlara Uygunluk / Compliance with Ethical Standards

Yazar tarafından, çalışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir.

It was declared by the author that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.

Etik Beyanı / Ethical Statement

Yazar tarafından bu çalışmada bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan edilmiştir.

It was declared by the author that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.

The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

KAYNAKÇA

- Abbasi, K.R., Adedoyin, F.F., Abbas, J. ve Hussain, K. (2021). "The Impact of Energy Depletion and Renewable Energy on CO₂ Emissions in Thailand: Fresh Evidence from the Novel Dynamic ARDL Simulation. *Renewable Energy*, 180, 1439-1450. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.078>
- Adebayo, T.S. ve Kirikkaleli, D. (2021). "Impact of Renewable Energy Consumption, Globalization, and Technological Innovation on Environmental Degradation in Japan: Application of Wavelet Tools", *Environment, Development and Sustainability*, 23(11), 16057-16082. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01322-2>
- Agyeman, F.O., Kedjanyi, E.A.G., Sampene, A.A., Dapaah, M.F., Monto, A.R., Buabeng, P. ve Samekong, G.C.G. (2023). "Exploring the Nexus Link of Environmental Technology Innovation, Urbanization, Financial Development, and Energy Consumption on Environmental Pollution: Evidence from 27 Emerging Economies", *Heliyon*, 9(6), 1-23. [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)03630-7](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)03630-7)
- Altın, H. (2024). "The Impact of Energy Efficiency and Renewable Energy Consumption on Carbon Emissions in G-7 Countries", *International Journal of Sustainable Engineering*, 17(1), 134-142. <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2319648>
- Azam, M., Uddin, I., Khan, A. ve Tariq, M. (2022). "Cross-sectional Dependence and Dynamic Panel Data Models: An Application to Environmental Kuznets Curve", *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 1234-1248. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15789-5>
- Bao B. ve Lin B. (2021). "Research on the Impact of Economic Growth and Technological Innovation on Carbon Emissions from the Perspective of Space", *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127502014>
- Brenton, A. (2013). "Great Powers in Climate Politics", *Climate Policy*, 13(5), 541-546
- Breusch, T.S. ve 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. <https://doi.org/10.2307/2297111>
- Chen, L. (2022). "How CO₂ Emissions Respond to Changes in Government Size and Level of Digitalization? Evidence from the BRICS Countries", *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 457-467. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15693-6>
- Chudik, A. ve 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>
- Du, L., Jiang, H., Adebayo, T.S., Awosusi, A.A. ve Razzaq, A. (2022). "Asymmetric Effects of High-tech Industry and Renewable Energy on Consumption-based Carbon Emissions in MINT Countries", *Renewable Energy*, 196, 1269-1280. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.028>
- Dünya Bankası. (2024a). "CO₂ Emissions (metric tons per capita)", <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC>, (Erişim Tarihi: 19.12.2024).
- Dünya Bankası. (2024b). "GDP Per Capita (constant 2015 US\$)", <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.KD>, (Erişim Tarihi: 19.12.2024).
- Fatima, N., Xuhua, H., Alnafisah, H. ve Akhtar, M.R. (2024). "Synergy for Climate Actions in G-7 Countries: Unraveling the Role of Environmental Policy Stringency between Technological Innovation and CO₂ Emission Interplay with DOLS, FMOLS and MMQR Approaches", *Energy Reports*, 12, 1344-1359. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.07.035>
- Fernández, Y.F., López, M.F. ve Blanco, B.O. (2018). "Innovation for Sustainability: The Impact of R&D Spending on CO₂ Emissions", *Journal of Cleaner Production*, 172, 3459-3467. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.001>
- Grossman, G.M. ve Krueger, A.B. (1991). "Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement", (No. w3914), National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w3914>
- Grossman, G. ve Kreuger, A. (1995). "Economic Growth and the Environment", *The Quarterly of Journal Economics*, 110(2), 353-377. <https://doi.org/10.2307/2118443>
- Hassan, S. T., Khan, D., Zhu, B. ve Batool, B. (2022). "Is Public Service Transportation Increase Environmental Contamination in China? The Role of Nuclear Energy Consumption and Technological Change", *Energy*, 238, 121890, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121890>
- Hayat, S., Safi, A., Wahab, S., Shahzad, K. ve Chen, Y. (2023). "Renewable Energy R&D and Natural Resources: A Success Story of Environmentally Friendly Financing in OECD Economies", *Resources Policy*, 83, 103655. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103655>
- He, X., Adebayo, T.S., Kirikkaleli, D. ve Umar, M. (2021). "Consumption-based Carbon Emissions in Mexico: An Analysis Using the Dual Adjustment Approach", *Sustainable Production and Consumption*, 27, 947-957. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.020>

- Heryadi, M.D. ve Hartono, D. (2016). "Energy Efficiency, Utilization of Renewable Energies, and Carbon Dioxide Emission: Case Study of G20 Countries", *International Energy Journal*, 16(4), 143-152. <http://www.ericjournal.ait.ac.th/index.php/eric/article/view/1496>
- Huang, J., Chen, X. ve Zhao, X. (2024). "How Digital Technology Reduces Carbon Emissions: From the Perspective of Green Innovation, Industry Upgrading, and Energy Transition", *Journal of the Knowledge Economy*, 1-33. <https://doi.org/10.1007/s13132-024-01895-z>
- Hye, Q.M.A., Ul-Haq, J., Visas, H. ve Rehan, R. (2023). "The Role of Eco-Innovation, Renewable Energy Consumption, Economic Risks, Globalization, and Economic Growth in Achieving Sustainable Environment in Emerging Market Economies", *Environmental Science and Pollution Research*, 30(40), 92469-92481. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28945-4>
- Ibrahim, R.L., Ajide, K.B., Usman, M. ve 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>
- Jaffe, A.B., Newell, R.G. ve Stavins, R.N. (2003). "Technological Change and the Environment", *Handbook of Environmental Economics* (Editörler: K-G Mäler and J.R. Vincent), Elsevier, 461-516. [https://doi.org/10.1016/S1574-0099\(03\)01016-7](https://doi.org/10.1016/S1574-0099(03)01016-7)
- Kao, C. ve Chiang, M.H. (2001). "On The Estimation and Inference of a Cointegrated Regression in Panel Data", *Advances in Econometrics*, 15, 179-222. [https://doi.org/10.1016/S0731-9053\(00\)15007-8](https://doi.org/10.1016/S0731-9053(00)15007-8)
- Karimi Alavijeh, N., Ahmadi Shadmehri, M. T., Nazeer, N., Zangoei, S. ve Dehdar, F. (2023). "The Role of Renewable Energy Consumption on Environmental Degradation in EU Countries: Do Institutional Quality, Technological Innovation, and GDP Matter?", *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 44607-44624. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25428-4>
- Kelly, N. (2006). "The Role of Energy Efficiency in Reducing Scottish and UK CO₂ Emissions", *Energy Policy*, 34(18), 3505-3515. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.07.019>
- Khan, I., Han, L., Bibi, R. ve Khan, H. (2022). "The Role of Technological Innovations and Renewable Energy Consumption in Reducing Environmental Degradation: Evidence from the Belt and Road Initiative Countries", *Environmental Science and Pollution Research*, 29(48), 73085-73099. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21006-2>
- Lucas, R.E. (1988). "On The Mechanics of Economic Development", *Journal of Monetary Economics*, 22(1), 3-42. [https://doi.org/10.1016/0304-3932\(88\)90168-7](https://doi.org/10.1016/0304-3932(88)90168-7)
- Mahmood, H. ve Tanveer, M. (2024). "Do Innovation and Renewable Energy Transition Play Their Role in Environmental Sustainability in Western Europe?", *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1), 1-9. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-02539-4>
- McCoskey, S. ve Kao, C. (1998). "A Residual-Based Test of The Null of Cointegration in Panel Data", *Econometric Reviews*, 17(1), 57-84. <https://doi.org/10.1080/07474939808800403>
- Mentel, G., Tarczyński, W., Azadi, H., Abdurakmanov, K., Zakirova, E. ve Salahodjaev, R. (2022). "R&D Human Capital, Renewable Energy and CO₂ Emissions: Evidence from 26 Countries", *Energies*, 15(23), 9205. <https://doi.org/10.3390/en15239205>
- Mughal, N., Arif, A., Jain, V., Chupradit, S., Shabbir, M. S., Ramos-Meza, C.S. ve Zhanbayev, R. (2022). "The Role of Technological Innovation in Environmental Pollution, Energy Consumption and Sustainable Economic Growth: Evidence from South Asian Economies", *Energy Strategy Reviews*, 39, 100745. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100745>
- Murshed, M., Rahman, M.A., Alam, M.S., Ahmad, P. ve Dagar, V. (2021). "The Nexus Between Environmental Regulations, Economic Growth, and Environmental Sustainability: Linking Environmental Patents to Ecological Footprint Reduction in South Asia", *Environmental Science and Pollution Research*, 28(36), 49967-49988. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13381-z>
- Nathaniel, S.P., Alam, M.S., Murshed, M., Mahmood, H. ve Ahmad, P. (2021). "The Roles of Nuclear Energy, Renewable Energy, and Economic Growth in the Abatement of Carbon Dioxide Emissions in the G-7 countries", *Environmental Science and Pollution Research*, 28(35), 47957-47972. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13728-6>
- Nguyen, T.T., Pham, T.A.T. ve Tram, H.T.X. (2020). "Role of Information and Communication Technologies and Innovation in Driving Carbon Emissions and Economic Growth in Selected G-20 Countries", *Journal of Environmental Management*, 261, 110162. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110162>
- Nordhaus W.D. (2007). "A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change", *Journal of Economic Literature*, 45(3) 686-702, <https://doi.org/10.1257/jel.45.3.686>
- Nordhaus, W.D. (2010). "Economic Aspects of Global Warming in a Post-Copenhagen Environment", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(26), 11721-11726. <https://doi.org/10.1073/pnas.1005985107>

- Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M.A., Haddad, H. ve Kitukutha, N. (2020). "Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability", *Sustainability*, 12(11), 46-74. <https://doi.org/10.3390/su12114674>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2024). "Research and Development Expenditure (% of GDP)", <https://data.oecd.org/rd/gross-domestic-spending-on-r-d.htm> (Erişim Tarihi: 10 Aralık 2024).
- Panayotou, T. (2000). "Economic Growth and The Environment". CID Working Papers 56, Center for International Development at Harvard University, <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.18574/nyu/9781479862689.003.0018/pdf?licenseType=restricted> (Erişim Tarihi: 28 Aralık 2024).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.236>
- Pesaran, M.H. (2004). "General Diagnostic Tests for Cross-section Dependence in Panels", CESifo Working Paper Series No. 1229. <https://doi.org/10.2139/ssrn.572504>
- 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. <https://doi.org/10.1002/jae.951>
- Pesaran, M.H., Ullah, A. ve Yamagata, T. (2008). "A Bias-Adjusted LM Test of Error Cross-Section Independence", *The Econometrics Journal*, 11(1), 105-127. <https://doi.org/10.1111/j.1368-423X.2007.00227.x>
- Phillips, P.C.B. ve Moon, H.R. (1999). "Linear Regression Limit Theory for Nonstationary Panel Data", *Econometrica*, 67(5), 1057-1111. <https://doi.org/10.1111/1468-0262.00070>
- Ritchie, H. ve Rosado, P. (2020). "Energy Mix", <https://ourworldindata.org/energy-mix>, (Erişim Tarihi: 15.01.2025).
- Ritchie, H., Rosado, P. ve Roser, M. (2020). "CO₂ Emissions by Fuel", <https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel>, (Erişim Tarihi: 15 Ocak 2025).
- Romer, P. M. (1986). "Increasing Returns and Long-Run Growth", *Journal of Political Economy*, 94(5), 1002-1037. <https://doi.org/10.1086/261420>
- Roser, M. (2021) "Fossil fuel subsidies: If we want to reduce greenhouse gas emissions, we should not pay people to burn fossil fuels". <https://ourworldindata.org/fossil-fuel-subsidies>, (Erişim Tarihi: 15 01.2025).
- Schumpeter, J.A (1942). "Capitalism, Socialism and Democracy", London: Allen &Unwin.
- Shen, Y., Yang, Z. ve Zhang, X. (2023). "Impact of Digital Technology on Carbon Emissions: Evidence from Chinese Cities", *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1166376, <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1166376>
- Sohag, K, Begum, R.A., Abdullah, S.M.S. ve Jaafar, M. (2015). "Dynamics of Energy Use, Technological Innovation, Economic Growth, and Trade Openness in Malaysia", *Energy*, 90, 1497-150. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.101>
- Stern, D.I. (2004). "The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve", *World Development*, 32(8), 1419-1439. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2004.03.004>
- Stern, N. (2008). "İklim Değişikliği Ekonomisi", *American Economic Review Papers & Proceedings*, 98 (2), 1-37. <https://doi.org/10.1257/aer.98.2.1>
- Ulucak, R. (2021). "Renewable Energy, Technological Innovation and the Environment: A Novel Dynamic Auto-Regressive Distributive Lag Simulation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111433. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111433>
- Uluslararası Enerji Ajansı. (2024). "Renewable Energy Consumption", <https://www.iea.org/reports/renewables-2022> (Erişim Tarihi: 10.11.2024).
- Westerlund, J. (2008). "Panel Cointegration Tests of the Fisher Effect", *Journal of Applied Econometrics*, 23(2), 193-233. <https://doi.org/10.1002/jae.967>
- Wongsapai, W., Ritkrerkkrai, C. ve Pongthanaisawan, J. (2016). "Integrated Model for Energy and CO₂ Emissions Analysis from Thailand's Long-Term Low-Carbon Energy Efficiency and Renewable Energy Plan", *Energy Procedia*, 100, 492-495. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.208>
- Xu, D., Sheraz, M., Hassan, A., Sinha, A. ve Ullah, S. (2022). "Financial Development, Renewable Energy, and CO₂ Emission in G-7 countries: New Evidence from Non-linear and Asymmetric Analysis" *Energy Economics*, 109, 105994. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105994>
- Zafar, M.W., Sinha, A., Ahmed, Z., Qin, Q. ve Zaidi, S.A.H. (2021). "Effects of Biomass Energy Consumption on Environmental Quality: The Role of Education and Technology in Asia-Pacific Economic Cooperation Countries", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110868. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110868>
- Zeng, J. ve Yang, M. (2023). "Digital Technology and Carbon Emissions: Evidence from China", *Journal of Cleaner Production*, 430, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139765>

- Zeraibi, A., Radulescu, M., Dembińska, I. ve Çoban, M. N. (2024). "The impact of China's Booming Tech Sector on Environmental Sustainability: An Analysis Through a Comprehensive CS-ARDL Approach", *Gondwana Research*, 134, 245-261. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2024.06.020>
- Zheng, H., Song, M. ve Shen, Z. (2021). "The Evolution of Renewable Energy and its Impact on Carbon Reduction in China", *Energy*, 237, 121639. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121639>
- Ziemnowicz, C. (2020). "Joseph A. Schumpeter and innovation", *Encyclopedia of Creativity, Invention Innovation and Entrepreneurship* (Editör: E.G. Carayannis), Springer, 1517-1522. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15347-6_300373

