



Türkiye'de Finansal Gelişme ve Teknolojik Yeniliklerin Karbon Emisyonu Üzerindeki Etkisi: RALS Yaklaşımından Elde Edilen Kanıtlar

The Impact of Financial Development and Technological Innovations on Carbon Emissions in Türkiye: Evidence from the RALS-EG Test Approach

Serkan Konya ^{a*}

^a Dr. Öğr. Üyesi, Artvin Çoruh Üniversitesi, Hopa Meslek Yüksekokulu, Yönetim ve Organizasyon Bölümü, Artvin/Türkiye, skonya@artvin.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0466-0773

MAKALE BİLGİSİ

ÖZ

Makale Türü

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler

Karbon Emisyonu
Teknolojik Yenilikler
RALS-EG

Geliş Tarihi : 31 Mayıs 2025

Kabul Tarihi: 30 Eylül 2025

Bu çalışma, 1984–2021 dönemi için Türkiye’de ekonomik büyüme, finansal gelişme ve teknolojik yeniliklerin karbon emisyonları üzerindeki etkilerini incelemektedir. Analizde RALS-ADF ve ADF birim kök testleri, RALS-EG ve Bayer-Hanck eşbütünlük testleri, FMOLS tahmin yöntemi ve Fourier tabanlı Granger nedensellik testi uygulanmıştır. Ampirik bulgular, ekonomik büyümenin karbon emisyonlarını en güçlü biçimde artırdığını, finansal gelişmenin emisyonları azaltıcı yönde etkili olduğunu, teknolojik yeniliklerin ise sınırlı düzeyde emisyon artışına yol açtığını göstermektedir. Ayrıca, nedensellik analizleri ekonomik büyüme ile emisyonlar ve finansal gelişme ile emisyonlar arasında çift yönlü ilişkiler olduğunu, emisyonlar ile teknoloji arasında ise asimimetrik bir nedensellik bulunduğunu ortaya koymaktadır. Sonuçlar, Türkiye’nin düşük karbonlu büyüme stratejileri geliştirmesi, finansal sistemin yeşil yatırımları desteklemesi ve teknoloji politikalarının yenilenebilir enerji ve çevre dostu uygulamalara yönlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article Type

Research Article

Keywords

Carbon Emissions
Technological Innovations
RALS-EG

Received: May, 05, 2025

Accepted: Sep, 30, 2025

This study examines the impact of economic growth, financial development, and technological innovation on carbon emissions in Turkey from 1984 to 2021. The analysis employs the RALS-ADF and ADF unit root tests, the RALS-EG and Bayer-Hanck cointegration tests, the FMOLS estimation method, and the Fourier-based Granger causality test. The empirical findings reveal that economic growth is the strongest driver of carbon emissions, while financial development has a mitigating effect on carbon emissions. Technological innovation, however, leads to a limited increase in emissions. Moreover, the causality analysis reveals bidirectional relationships between economic growth and emissions, as well as between financial development and emissions. In contrast, an asymmetric causality is found between emissions and technology. Overall, the results suggest that Turkey should design low-carbon growth strategies, strengthen its financial system to support green investments, and reorient technology policies toward renewable energy and environmentally friendly practices.

Extended Abstract

Aim: This study aims to analyze the long-term effects of economic growth, financial development, and technological innovation on carbon emissions in Türkiye from 1984 to 2021.

Methods: The analysis is based on annual data covering the years 1984–2021, sourced from the World Bank Development Indicators and BP’s World Energy Statistics. The variables include carbon emissions (CO₂), per capita GDP, financial development (measured by domestic credit to the private sector as a percentage of GDP), and technological innovation (represented by patent applications). To address non-normality and lessen the impact of extreme values, all variables were log-transformed.

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

Atıf/Cite as: Konya, S. (2025). Türkiye’de Finansal Gelişme ve Teknolojik Yeniliklerin Karbon Emisyonu Üzerindeki Etkisi: RALS Yaklaşımından Elde Edilen Kanıtlar. *Uluslararası Ekonomi, İşletme ve Politika Dergisi*, 9(2), 923-940. <https://doi.org/10.29216/ueip.1710897>



Bu makale, [Creative Commons Atıf \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) lisansının hüküm ve koşulları altında dağıtılan açık erişimli bir makaledir. / This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

The methodological framework involved a multi-step econometric process. First, the unit root properties of the series were examined using both the conventional Augmented Dickey-Fuller (ADF) test and the Residual Augmented Least Squares –ADF (RALS-ADF) test. The ADF test, though widely used, assumes normality of residuals, which can reduce its power if violated. The RALS-ADF test addresses this limitation by incorporating skewness and kurtosis, yielding more robust outcomes under non-normal conditions.

Second, the long-term relationships among variables were assessed through the Residual Augmented Least Squares–Engle and Granger (RALS-EG) cointegration test, which extends the classical Engle-Granger (1987) procedure by correcting for higher-moment biases. This test is particularly useful in small samples where non-normality may distort the results. The existence of cointegration was further confirmed by the Bayer-Hanck combined cointegration test, which integrates multiple cointegration approaches to strengthen inference. Third, once cointegration was established, long-run coefficients were estimated using the Fully Modified Ordinary Least Squares (FMOLS) estimator. This method corrects for potential serial correlation and endogeneity, thereby producing unbiased estimates of long-term elasticities. Finally, to capture causal dynamics and structural breaks, the Fourier-based Granger causality test was employed. This test allows for smooth and gradual shifts in causal relationships, which is particularly relevant for economies like Türkiye that have undergone structural reforms, crises, and policy changes during the study period. The robustness of the model was confirmed through diagnostic checks for serial correlation (Breusch-Godfrey LM test), heteroskedasticity (Breusch-Pagan test and ARCH test), model specification (Ramsey RESET test), and normality (Jarque-Bera test). The results confirmed that the model satisfies key econometric assumptions, ensuring the reliability of findings.

Findings: The empirical analysis revealed several key findings. First, both the ADF and RALS-ADF tests confirmed that all variables are non-stationary at their levels but become stationary after the first differencing, indicating they are integrated of order one, $I(1)$. The RALS-ADF test provided more substantial evidence of stationarity compared to the traditional test, demonstrating its greater robustness in the presence of distributional asymmetries. The RALS-EG cointegration test confirmed a long-term relationship among the variables, with a test statistic of -6.725 , exceeding the 1% critical value threshold. This indicates that carbon emissions, economic growth, financial development, and technological innovation are interconnected in a long-term equilibrium. The Bayer-Hanck combined test supported this conclusion, strengthening the evidence of cointegration.

The FMOLS estimation of long-term elasticities showed that economic growth is the most influential and statistically significant factor driving carbon emissions. Specifically, a 1% increase in per capita GDP results in a 0.783% increase in emissions. This aligns with the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis, particularly its initial stage, where economic growth initially exacerbates environmental degradation. The finding also aligns with broader research documenting the growth-emissions relationship in developing countries.

Financial development, on the other hand, displayed a negative and significant effect on carbon emissions. A 1% increase in financial development results in a 0.337% decrease in emissions. This suggests that a more developed financial system can support sustainable investments, energy efficiency improvements, and environmentally friendly projects. The result supports previous studies that emphasize the role of financial markets in promoting cleaner production and the adoption of renewable energy. Technological innovation was found to have a positive but marginal impact on emissions, with a coefficient of 0.074, significant at the 10% level. This suggests that technological innovations in Türkiye during the study period were not primarily green, but rather more closely related to industrial expansion and energy-intensive processes. The dual nature of innovation—both potentially polluting and environmentally friendly—underscores the importance of policies that direct innovation toward eco-friendly technologies.

The Fourier-based Granger causality analysis revealed complex causal relationships. Bidirectional causality existed between economic growth and carbon emissions, as well as between financial development and carbon emissions, indicating the presence of feedback loops. Additionally, there was unidirectional causality from technological innovation to emissions, and emissions also influenced technological innovation, reflecting a reciprocal but asymmetric relationship. This suggests that rising emissions might stimulate technological responses, though not always aligned with sustainability goals.

Conclusion: In conclusion, the study's findings carry important policy implications for Türkiye's pursuit of sustainable development and its commitments under international climate agreements. The positive link between economic growth and carbon emissions indicates that Türkiye's current growth path, if unchanged, will continue to pose environmental challenges. This underscores the need for a fundamental shift toward low-carbon growth strategies. The role of financial development in mitigation highlights the potential to use financial systems to support the green transition. Policymakers should encourage banks and financial institutions to increase green lending, develop sustainable financial products, and incentivize investments in renewable energy and low-carbon industries. Regulatory frameworks can help align financial development with environmental goals. The mixed effects of technological innovation reveal the need for policy measures to ensure innovation supports sustainability. Without targeted support for R&D in clean technologies, innovations may remain linked to industrial activities that raise emissions. Therefore, government policies that promote eco-innovation, renewable energy technologies, and sustainable infrastructure are essential. The causality findings also suggest that environmental outcomes and economic-financial dynamics reinforce each other. Hence, policy strategies should integrate these domains rather than treat them separately, aligning economic growth, financial development, and technological innovation with environmental sustainability. Practically, the study recommends:

- Prioritizing green finance mechanisms to direct financial flows into environmentally friendly investments.
 - Increasing the adoption of renewable energy within Türkiye's energy mix to reduce reliance on fossil fuels.
 - Attracting foreign direct investment in low-carbon sectors and discouraging capital inflows into energy-intensive industries.
 - Improving urban planning and public transportation infrastructure to harness the emission reduction potential of sustainable urbanization.
 - Elevating R&D spending specifically focused on green technologies to ensure innovation benefits the environment.
- In conclusion, while immediate and drastic emission cuts may not be feasible for a fossil fuel-dependent economy like Türkiye's, aligning financial development and technological innovation with sustainability goals can help meet its Nationally Determined Contributions and long-term climate commitments. The study not only enriches the empirical literature through advanced econometric techniques, such as the RALS-EG cointegration test and Fourier-based causality analysis, but also offers practical insights for policymakers aiming to balance economic growth with environmental responsibility.

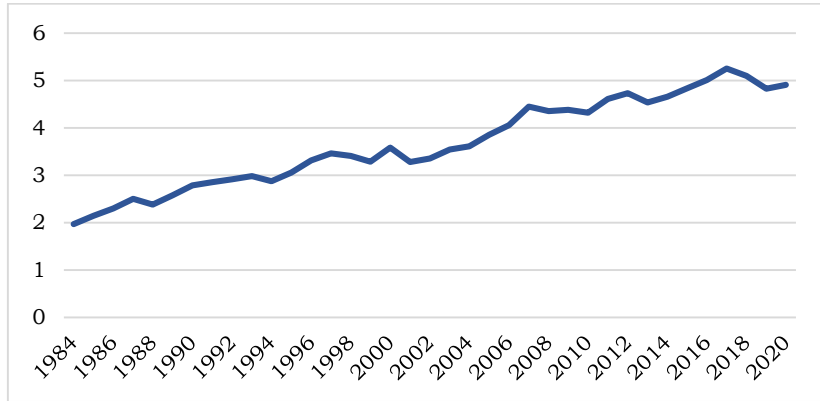
1. Giriş

Gelişen ekonomilerde en büyük sorunlardan biri, düşük karbon emisyonu seviyesinde ekonomik büyüme sağlarken aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmaktır. Bu nedenle ülkeler, farklı yöntemlerle karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik politikalar uygulamaktadır. En sık kullanılan politikalar arasında fosil yakıt kullanımının azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, enerji verimliliğini artıracak düzenlemelerin geliştirilmesi, karbon vergisi uygulaması, sanayi üretim süreçlerinde emisyonların düşürülmesi için önlemler alınması, orman alanlarının genişletilmesi ve üst sınır (cap) politikalarının hayata geçirilmesi yer almaktadır. Ayrıca, araştırma-geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerinin artırılması da karbon emisyonlarının azaltılmasında önemli bir araçtır (Fernández vd., 2018; Ganda, 2019; Petrović ve Lobanov, 2020).

Birçok ülke, ekonomik olarak büyüme sağlayabilmek için her türlü sektörde var olmaya çalışırken çevresel sorunları geri planda tutmaktadır. Özellikle insani ihtiyaçların karşılanmasında çevreye bir miktar zarar verilmesi kaçınılmaz olduğu öngörülmektedir (Shahbaz vd., 2017: 548). Dünya çapındaki endüstriyel şirketlerin insani ihtiyaçları karşılarken karbon emisyon düzeyini düşük tutmaları iklim değişikliğiyle mücadeleyi kolaylaştıracaktır. Bu hedeflere ulaşmak için gerekli teknolojilerin geliştirilmesi ve yeni düşük karbonlu ürünler ile süreçlerin ortaya çıkarılmasında Ar-Ge faaliyetleri kritik bir rol üstlenmektedir. Dolayısıyla Ar-Ge, hem ekonomik büyümenin katalizörü hem de çevresel sorunların azaltılmasında önemli bir politika unsurudur (Gonenc ve Poleska 2023). Sagar ve Zwaan'a göre (2006), teknolojik yenilik hem enerji ekonomisinin gidişatı için hem de hava kirliliği ile iklim değişikliği gibi çevresel endişelerin giderilmesi için olmazsa olmazdır. Özellikle gelişmiş ülkelerde Ar-Ge harcamalarının artması, karbon emisyonlarının azaltılmasına önemli katkılar sağlamaktadır (Fernández vd., 2018).

Bununla birlikte, gelişmekte olan ülkelerde finansal gelişmeler de karbon emisyonlarının belirleyicilerinden biridir. Finansal gelişmeler, bir yandan çevreci yatırımların finansmanına imkân verirken, diğer yandan çevresel tahribatı artırabilecek sermaye hareketlerini de beraberinde getirebilmektedir (Khan, Hou, ve Le 2021). Dolayısıyla Ar-Ge faaliyetleri, finansal gelişme ve ekonomik büyüme, çevre ekonomisi literatüründe karbon emisyonlarını etkileyen üç temel değişken olarak öne çıkmaktadır.

Grafik 1. Türkiye'deki CO₂ Emisyon Miktarı (Kişibaşı ton, 1984-2020 Dönemi)

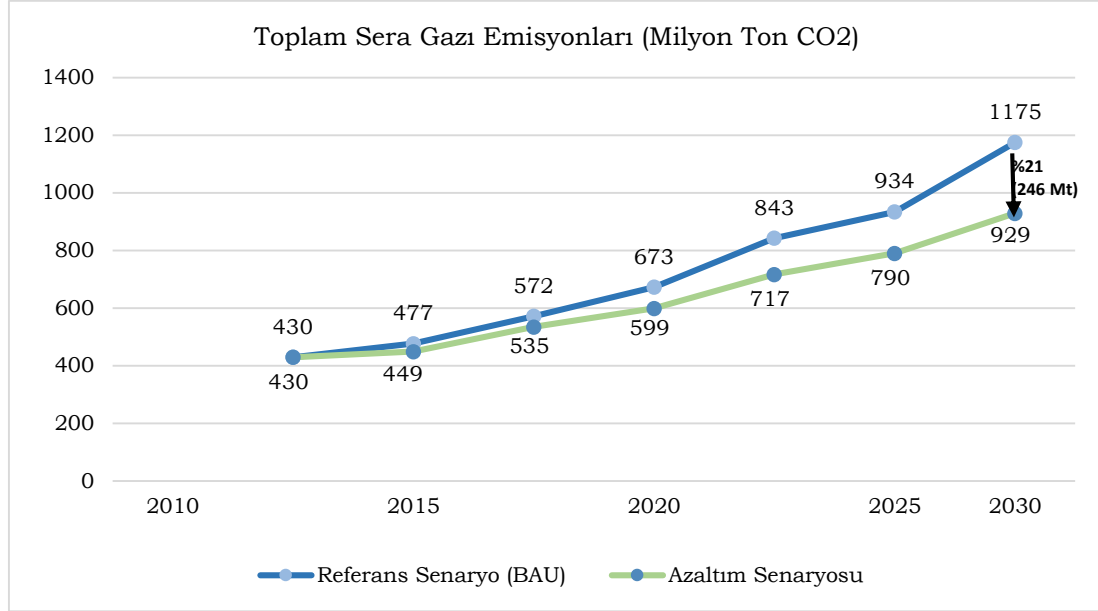


Kaynak: Our World in Data (2024)

Şekil 1, Türkiye'de kişi başına düşen CO₂ emisyonlarının 2017 yılında zirveye ulaştığını ve sonraki yıllarda düşüş eğilimine girdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, Türkiye'de emisyon seviyelerinin uzun vadede artış eğilimini sürdürdüğü ve mevcut azaltım çabalarının yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır. Gelişmekte olan bir ekonomi olarak Türkiye, enerji üretimi ve sanayide fosil

yakıtlara yüksek düzeyde bağımlıdır; bu durum ise önemli miktarda CO₂ emisyonuna yol açmaktadır. Ayrıca Türkiye'nin Paris Anlaşması ve Ulusal Katkı Beyanı (NDC) çerçevesinde 2030 yılına kadar azaltım hedefi bulunmaktadır. Bu hedef, ülkenin düşük karbonlu büyüme stratejileri geliştirme ihtiyacını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla Türkiye örneği hem artan enerji talebi hem de uluslararası iklim yükümlülükleri nedeniyle incelenmeye değer bir vaka niteliği taşımaktadır.

Grafik 2: Türkiye Sera Gazı Emisyon Hedefleri



Kaynak: UNFCCC (2015)

Şekil 2, Türkiye'nin 2010-2030 yılları arasındaki sera gazı emisyonlarını iki farklı senaryo altında göstermektedir. İlkinde referans senaryo (BAU), ikincisinde ise Paris Anlaşması ve Ulusal Katkı Beyanı (NDC) çerçevesinde hazırlanan azaltım senaryosu sunulmaktadır. Her iki senaryoda da emisyonlar zamanla artış göstermektedir; ancak azaltım senaryosunda bu artış daha yavaş gerçekleşmektedir. 2030 yılına gelindiğinde, hedeflenen emisyon miktarının referans senaryoya kıyasla %21 daha düşük olacağı öngörülmektedir. Gerekli önlemler alındığı takdirde, Türkiye'nin 2030 yılında mevcut duruma göre 246 milyon ton daha az emisyon salması beklenmektedir. Bu ise çevresel açıdan önemli bir kazanım anlamına gelmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'de 1984-2021 döneminde Ar-Ge faaliyetleri ve finansal gelişmelerin karbon emisyonları üzerindeki etkilerini incelemektir. Çalışmada şu iki temel araştırma sorusuna yanıt aranmaktadır: (i) Ar-Ge faaliyetleri karbon emisyonlarını azaltmada ne ölçüde etkilidir? (ii) Finansal gelişmeler çevresel performansı nasıl etkilemektedir? Çalışmanın önemi, Türkiye'nin düşük karbonlu büyüme politikalarına yön verebilecek ampirik bulgular sunmasından kaynaklanmaktadır.

Literatüre katkı açısından çalışma üç boyutta değerlendirilmektedir. İlk olarak, Türkiye özelinde Ar-Ge faaliyetlerinin karbon emisyonları üzerindeki etkisini uzun dönemli veri seti kullanarak analiz etmesi bakımından literatüre özgün bir katkı sunmaktadır. İkinci olarak, finansal gelişmelerin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki rolünü tartışarak çevre ekonomisi yazınına yeni ampirik kanıtlar eklemektedir. Üçüncü olarak ise, uzun dönem ilişkilerin test edilmesinde kullanılan RALS-EG eşbütünleşme testi, literatürde sınırlı sayıda çalışmada uygulanmış olması nedeniyle yöntemsel açıdan farklılık yaratmaktadır. Böylece çalışma, hem gelişmekte olan ülkeler literatürüne katkı yapmakta hem de Türkiye'nin iklim politikalarına yönelik öneriler geliştirmektedir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2’de teknolojik yenilikler, ekonomik büyüme ve finansal gelişmelerin karbon emisyonları üzerindeki etkilerini inceleyen literatür özetlenmektedir. Bölüm 3’te veri kaynakları ve modelin oluşturulmasına ilişkin ayrıntılar sunulmaktadır. Bölüm 4’te çalışmada kullanılan ekonometrik yöntemler açıklanmakta, Bölüm 5’te ise analiz sonuçları verilmekte, bulgular tartışılmakta ve politika önerileriyle çalışma tamamlanmaktadır.

2. Literatür Taraması

Literatürde Türkiye üzerine yapılan araştırmalarda ekonomik büyümenin, kentleşmenin, finansal gelişmelerin ve teknolojik yeniliklerin karbon emisyonları üzerindeki etkileri farklı yöntemlerle ele alınmıştır. Bu çalışmaların çoğu, ekonomik büyümenin emisyonları artırdığını; teknolojik yeniliklerin ve finansal gelişmelerin ise emisyonları azalttığını ortaya koymaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalara bakıldığında, Gültekin (2023) finansal gelişme endeksi, patent sayıları ve kişi başına GSYH ile CO₂ emisyonu arasındaki ilişkiyi ARDL yöntemiyle analiz etmiş; finansal gelişme ve ekonomik büyümenin emisyonları artırdığını, inovasyonun ise azaltıcı etkisi olduğunu bulmuştur. Benzer biçimde Koçak (2024), 1990–2018 dönemine ait CO₂ emisyonu, finansal gelişme endeksi, kişi başına GSYH ve çevresel teknoloji verilerini ARDL ve Toda–Yamamoto nedensellik testiyle incelemiş; bulgular Gültekin (2023) ile paralellik göstermiştir. Doğan (2023), 1985–2020 dönemi için ARDL sınır testi ve FMOLS yöntemiyle finansal gelişme, patent başvuruları ve ekonomik büyümenin ekolojik ayak izi üzerindeki etkilerini araştırmış; finansal gelişme ve teknolojik inovasyonun ekolojik sürdürülebilirlik ile pozitif ilişkili olduğuna dair kanıtlar sunmuştur. Şeyranlioğlu (2024), 1960–2014 dönemini kapsayan çalışmasında ARDL sınır testi, FMOLS, DOLS ve CCR yöntemlerini kullanarak finansal gelişme, ekonomik büyüme, enerji tüketimi, imalat sanayi ve inşaat sektörünün CO₂ emisyonlarına etkisini analiz etmiştir. Sonuçlar, finansal gelişmenin emisyonları azalttığını, ekonomik büyümenin ise artırdığını göstermektedir. Yağış (2024) ise 1984–2021 dönemi verileriyle ARDL sınır testini uygulayarak teknolojik yenilikler, kentleşme ve ekonomik büyümenin emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemiş; teknolojik yeniliklerin emisyonları azalttığı, kentleşme ve büyümenin ise artırdığı sonucuna ulaşmıştır.

Genel olarak Türkiye odaklı çalışmalarda ARDL yaklaşımı ve benzeri zaman serisi yöntemlerinin tercih edildiği, finansal gelişme, ekonomik büyüme, kentleşme ve teknolojik yenilik değişkenlerinin öne çıktığı görülmektedir. Ancak bu çalışmaların çoğunda uzun dönem ilişkilerin incelenmesinde daha gelişmiş eşbütünleşme yöntemleri kullanılmamış, ayrıca Ar-Ge harcamaları doğrudan araştırma odağı yapılmamıştır. Dolayısıyla bu çalışmanın katkısı, Türkiye için Ar-Ge harcamaları ile finansal gelişmeleri karbon emisyonlarıyla ilişkilendirerek, uzun dönemli ilişkileri RALS-EG eşbütünleşme testi aracılığıyla analiz etmesinde yatmaktadır. Böylece çalışma, önceki araştırmalardan yöntemsel ve içerik bakımından ayrılmaktadır. Literatürde model farklı örneklerle çeşitli kez test edilmiş olup, Tablo 1’de finansal gelişme, ekonomik büyüme ve teknolojik yeniliklerin CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmaların özeti sunulmaktadır.

Tablo 1: Literatür Taramasının Özeti

Yazar	Kapsam	Zaman Aralığı	Yöntem	Sonuç
Boutabba (2014)	Hindistan	1971-2008	ARDL ve Nedensellik	FG'lerden CO ₂ 'ye doğru tek yönlü nedensellik ve uzun dönemde FG CO ₂ 'yi olumlu yönlü bir etkisi var.
Fernández vd. (2018)	AB (15 ülke) ABD ve Çin	1990-2013	EKK-Doğrusal Regresyon	TY artış CO ₂ 'yi azaltıyor
Ganda (2019)	OECD ülkeleri	2000-2014	Panel veri analizi	Ar-Ge harcamaları CO ₂ 'yi azaltıyor
Jiang ve Ma (2019)	155 ülke	1990-2014	Panel veri analizi	FG gelişmekte olan ülke ve piyasalarda CO ₂ 'yi önemli ölçüde artırmaktadır
Chen vd. (2020)	Çin'in 30 eyaleti	2005-2015	Divisia Endeks ve Etki Ayrıştırması	Orta ve Batı Çin'deki TG CO ₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltırken, Doğu Çin'de TG CO ₂ emisyonunu artırmaktadır.
Chen ve Lee (2020)	96 ülke	1996-2018	Mekansal panel veri analizi	TY artış CO ₂ 'yi azaltıyor
Cheng vd. (2020)	OECD ülkeleri	1996-2015	Panel veri analizi	TY artış CO ₂ 'yi azaltıyor
Erdoğan vd. (2020)	G20	1991-2017	Panel veri analizi	Uzun dönemde, sanayi sektöründe TG'nin artması karbon emisyonlarında azalmaya yol açtı.
Petrović ve Lobanov (2020)	OECD'ye üye 16 ülke	1981-2014	Zaman serisi analizi	TY artış CO ₂ 'yi azaltıyor
Shoaib vd. (2020)	D8 ve G8 ülkeleri	1999-2013	Panel ARDL	FG uzun dönemde CO ₂ emisyonunu artırıyor. Bu etki G8'e göre D8'de daha belirgin.
Zhang, Li, ve Yin (2020)	Çin'in eyaletleri	2005-2016	Panel veri analizi	TY'ler CO ₂ emisyonlarını azaltmaktadır.
Cai vd. (2021)	Çin'in 30 eyaleti	2006-2019	Panel veri analizi	Yeşil TG'deki ilerleme ile CO ₂ emisyonu arasında negatif yönlü bir korelasyon vardır ancak bu etki belirgin değildir. Doğu ve orta bölgelerde emisyonu azaltabilmektedir.
Destek ve Manga (2021)	Big Emerging Markets (BEM)	1995-2016	Panel veri analizi	TY artış CO ₂ azaltıyor
Erdoğan (2021)	BRICS ülkeleri	1992-2018	Panel veri analizi	İnşaat sektöründeki TG'ler CO ₂ 'yi azaltıyor.
Qayyum vd. (2021)	Hindistan	1980-2019	ARDL ve VECM model	FG CO ₂ üzerinde olumlu etkisi varken TY artış CO ₂ azaltıyor
Sheraz vd. (2021)	G20	1986-2018	Panel veri analizi	FG CO ₂ emisyonunu azaltmakta
Wahab (2021)	G7	1990-2018	Panel veri analizi	TG ihracatın karbon kullanımına olumsuz etkisi varken, ithalatın GSYİH'nin tüketime dayalı karbon emisyonları üzerinde olumlu etkisi bulunmaktadır.
Zhao vd. (2021)	62 ülke	2003-2018	Panel veri analizi	TY artış CO ₂ azaltıyor
Liu, Tang, ve Liu (2022)	Çin'in 30 eyaleti	2008-2019	Mekansal Ekonometri	TG eyalet bazında CO ₂ emisyonunu azaltıyor ve bu durum komşu eyaletleri de etkiliyor
Tsimisaraka vd. (2023)	OBOR bölgesinde en çok emisyonu sahip 10 ülke	2004-2019	Panel ARDL	FK, BİT ve CO ₂ emisyonları arasında hem uzun hem de kısa vadede güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir.
Lau vd. (2024)	Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin ve Güney Afrika	1990-2018	Panel veri analizi ve Panel ARDL	Teknoloji çevre kalitesini önemli ölçüde etkiliyor. Ancak, ekonomi ve nüfus artışı uzun vadede doğal çevreyi bozuyor.

Tablo 1'den görüldüğü üzere, uluslararası literatürde genel eğilim teknolojik yeniliklerin emisyonları azalttığını; finansal gelişmelerin ise ülkelere ve dönemlere bağlı olarak hem artırıcı hem de azaltıcı etkiler gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, Türkiye odaklı çalışmaların sınırlı kalması ve çoğunlukla benzer yöntemlere dayanması, konunun daha çeşitli ekonometrik

yaklaşımlarla incelenmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, çalışmamız literatürdeki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

3. Araştırmanın Modeli, Verileri ve Metodolojisi

Bu çalışmada, 1984–2021 dönemine ait veriler kullanılarak dinamik RALS-EG yaklaşımı ile Türkiye’de finansal gelişme, ekonomik büyüme ve teknolojik yeniliklerin karbon emisyonları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan veriler Dünya Bankası (World Bank, 2025) veri tabanından ve BP’nin (British Petroleum, 2025) dünya enerji istatistikleri veri tabanından elde edilmiştir. Analizde değişkenlerin logaritmik değerleri kullanılmıştır. Bu tercih, serilerin orijinal halleriyle normal dağılım varsayımını karşılamaması ve uç değerlerin etkisini azaltma gerekliliğinden kaynaklanmaktadır. Logaritmik dönüşüm, dağılımın daha simetrik hale gelmesini sağlamış ve değişkenler arasındaki ilişkilerin daha sağlıklı biçimde incelenmesine imkân tanımıştır. Ayrıca, literatürde ekonomik ve finansal zaman serilerinde logaritmik dönüşümün yaygın olarak kullanılması da yöntemin seçilmesinde etkili olmuştur. Tablo 2’de araştırmada kullanılan değişkenlere ait kısaltmalar ve temel bilgiler sunulmaktadır.

Tablo 2: Kullanılan Değişkenler ve Açıklamaları

Kısaltma	Değişken	Detay	Kaynaklar
CO ₂	Karbon Salınımı	CO ₂ Emisyonları (Milyon Metre Karbon Dioksit)	BP (2023)
FD	Finansal Gelişmeler	Bankalar tarafından özel sektöre sağlanan yurtiçi krediler (GDP %)	WDI
PGDP	Ekonomik Büyüme	Kişi Başına Düşen GSYİH (\$)	WDI
TEC	Teknolojik yenilik	Yerleşik Olmayan ve Yerleşik Olan Patent Toplamı	WDI

Çalışmada kullanılan fonksiyonel model aşağıdaki gibidir.

$$\ln CO_t = f(FD_t, PGDP_t, TEC_t) \quad (1)$$

Zaman serisi analizlerinde serilerin birim kök içerip içermediğinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Birim kök içeren serilerle kurulan modeller, sahte regresyon gibi sapmalara yol açabilmektedir. Bu nedenle çalışmada öncelikle Augmented Dickey-Fuller (ADF) (1981) testi uygulanmıştır. Ancak ADF testi, kalıntıların normal dağıldığını varsaydığından, bu varsayım ihlal edildiğinde testin gücü azalmaktadır. Bu sorunu aşmak için ikinci aşamada RALS-ADF testi kullanılmıştır. RALS-ADF testi, kalıntıların basıklık ve çarpıklık moment bilgilerini modele dâhil ederek daha dayanıklı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, bağımsız değişkenler arasındaki ilişkilere bağlı olarak ortaya çıkabilecek sapmalara karşı da daha güvenilir sonuçlar sunabilmektedir.

3.1. RALS-EG Eşbütünleşme Testi

Engle ve Granger’ın (1987) eşbütünleşme testi, durağan olmayan değişkenler arasındaki uzun dönemli denge ilişkisini tahmin etmek için geliştirilmiş bir yöntemdir. Eşbütünleşme, zaman serilerinin durağan olmadığı ancak birlikte kullanıldığında durağan bir durum gösterebildiğinde ortaya çıkmaktadır. Durağan olmayan seriler için kurulan modellerden elde edilen regresyon sonuçları hatalı ilişkiler ortaya koyabilmektedir. Bu tür problemlerin giderilebilmesi için serilerin fark düzeyleri ile tahmin edilmesi daha doğru sonuçlar doğuracaktır. Ancak fark serileri ile tahminde bulunmak hem uzun dönemli ilişkinin tespit edilmesini güçleştirecek hem de veri kaybı gibi sorunları beraberinde getirecektir. Durağan olmayan serilerde bu tür sorunların giderilmesi ve serilerin uzun dönemli ilişkisinin tespiti için eşbütünleşme testleri kullanılmaktadır.

Klasik Engle Granger testi, küçük örneklem büyüklüklerinde, kalıntı ortalamalarının normal dağılım gösterdiğini varsayarak güvenilir sonuçlar verebilmektedir. Kalıntı ortalamalarının normal dağılım göstermediği serilerden hatalı sonuçlar elde edilmektedir. Bu durumların giderilebilmesi

için, Lee ve Im (2015) Engle Granger testini geliştirerek, kalıntı ortalamalarında olabilecek çarpıklık ve basıklık gibi sapmaları dikkate alan daha güvenilir ve güçlü bir eşbütünleşme testi önermişlerdir. RALS-EG (Residual Augmented Least Squares–Engle-Granger) eşbütünleşme testi, hata terimlerinin ikinci ve üçüncü momentlerini dikkate alarak, modelin dağılımsal sapmalara karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Ayrıca RALS-EG testi, küçük örneklemelerde içinde tutarlı ve güçlü sonuçlar elde edilmesini sağlar.

EG testi uygulamada, kalıntıları ve t istatistiğini kullanarak iki aşamalı bir eşbütünleşme analizi yöntemi kullanılmaktadır. İlk aşamada, serilerin durağanlık düzeyleri belirlenir ve daha sonra eşbütünleşme için regresyon modeli tahmin edilir (1):

$$y_t = \beta x_t + u_t \quad (2)$$

Regresyon modelinden elde edilen kalıntılar için ADF birim kök testi ile birim kök içerip içermediğine bakılır: $\hat{u}_t$

$$\Delta \hat{u}_t = \alpha_0 + \alpha_1 \hat{u}_{t-1} + \sum_{i=1}^k \alpha_{i+1} \Delta \hat{u}_{t-1} + e_t \quad (3)$$

Kalıntıların ikinci veya üçüncü dereceden momentleri, eğer hata terimleri normal dağılım göstermiyorsa, sapmaların yapısal özellikleri hakkında bilgi barındırmaktadır. Bu durum dağılımın çarpıklık ve basıklık gibi temel özelliklerini ifade etmektedir. Doğrusal model çerçevesinde Im ve Schmidt (2008) tarafından önerilen RALS yöntemi, kalıntıların normal dağılmadığı durumlarda, bu sapmaların içermediği yüksek moment bilgilerini modele ekleyerek istatistiksel gücünü artırmaktadır. Bu nedenle, kalıntıların dağılımı normalden sapma gösterdiğinde RALS yaklaşımıyla klasik yöntemlere göre daha güvenilir ve güçlü sonuçlar elde edilebilmektedir. RALS-EG yöntemini uygulamak için EG testinin ikinci aşamasındaki model yeni terimle genişletilerek kullanılır:

$$\hat{w}_t = g(\hat{e}_t) - \hat{S} - \hat{e}_t \hat{M}_2, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

Denklem (3)'de verilmiş olan $g(\hat{e}_t) = [\hat{e}_t^2, \hat{e}_t^3]'$, $\hat{S} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T h(\hat{e}_t)$ ve $\hat{M} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T h'(\hat{e}_t)$ şeklinde ifade edilir. $\hat{w}_t$ terimi ise:

$$\hat{w}_t = [\hat{e}_t^2 - m_2, \hat{e}_t^3 - m_3 - 3m_2 \hat{e}_t]' \quad (5)$$

Denklem (4)'de $m_j = T^{-1} \sum_{t=1}^T \hat{e}_t^j$ ifade edilir.

$$\Delta \hat{u}_t = \alpha_1 \hat{u}_{t-1} + \sum_{i=1}^k \alpha_{i+1} \Delta \hat{u}_{t-1} + \hat{w}_t' + v_t \quad (6)$$

Denklem (5)'de, değişkenlerin uzun dönemli durağanlık durumlarının olmadığı yönündeki sıfır hipotezi, aynı zamanda eşbütünleşmenin olmadığını ifade etmektedir. T istatistiğinin asimtotik dağılımı aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$t^* \rightarrow \rho \cdot t + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot Z \quad (7)$$

Denklem (6)'da t ve t* sırasıyla EG ve RALS-EG test istatistiklerini ifade eder. ρ Denklem (2)'nin kalıntıları (e_t) ve Denklem (5)'in kalıntıları (v_t) arasında uzun dönemli korelasyonu temsil etmektedir. Z ise, standart normal rastgele değişkeni ifade etmektedir.

3.2. Fourier Tabanlı Nedensellik Testi

Granger'ın (1969) nedensellik testi değişkenlerin nedensellik ilişkisini test edebilmesi için değişkenlerin aynı durağanlık düzeyine sahip olması gerekmektedir. Toda ve Yamamoto (1995), Granger'ın (1969) öne sürdüğü nedensellik testini geliştirerek değişkenlerin farklı durağanlık seviyelerine sahip olmalarına rağmen analizlerine imkân tanımıştır. Toda ve Yamamoto (1995), Granger (1969) gibi geleneksel birim kök testleri yapısal kırılmaları göz ardı etmektedir. Bu nedenle yapısal kırılmaları esnek bir biçimde modele dahil eden daha gelişmiş nedensellik testleri ortaya çıkmıştır. Enders ve Jones'ın (2016) Granger nedensellik testini tekrar ele almaları ile VAR modeline Fourier fonksiyonlarını dahil ederek nedensellik ilişkisindeki olası yapısal kırılmaların zamansal

veya biçimsel olarak herhangi bir ön yüklemde bulunulmadan modele dahil etmektedir. Yapısal kırılmaları modele dahil ederken kırılmaları, doğrusal olmayan, kademeli veya yumuşak geçişli kırılma olarak dahil eder. Değişkenlere Fourier fonksiyonunda var olan sinüs ve kosinüs terimlerini dahil ederek, geleneksel testlerin olası yapısal kırılmalarından kaynaklı modelin reddedilme risklerini ortadan kaldırır. Enders ve Jones (2016), Fourier tabanlı nedensellik testi için öncelikle serideki zamanla değişen yapısal değişim Fourier denklemi kullanılarak elde edilir:

$$d(t) = \alpha^0 + \sum_{k=1}^K \left[\alpha_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \beta_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) \right] \quad (8)$$

Denklem (6)'da $d(t)$ Fourier yaklaşımı ile zamanla değişen yapısal değişimi, k frekans sayısını, α_k, β_k ise Fourier katsayılarını ifade eder. İki değişken (X_t, Y_t) arasındaki nedenselliği test etmek için Denklem (9) ve (10) kullanılır. Y_t 'den X_t 'ye doğru nedenselliğini test etmek için aşağıdaki denklem kullanılır:

$$X_t = c + \sum_{i=1}^p \phi_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^p \theta_j Y_{t-j} + d(t) + \varepsilon_t \quad (9)$$

X_t 'den Y_t 'ye doğru nedenselliğini test etmek için ise aşağıdaki denklem kullanılır:

$$Y_t = c + \sum_{i=1}^p \phi_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^p \theta_j X_{t-j} + d(t) + \varepsilon_t \quad (10)$$

Denklem (8) ve (9) için p , bilgi kriterleri ile elde edilen gecikme uzunluğunu göstermektedir.

4. Ampirik Bulgular

RALS-EG eşbütünleşme testini uygulamadan önce, serilerin I(2) düzeyinde olup olmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Zira serilerin I(2) olması halinde elde edilen sonuçlar geçerliliğini yitirmektedir. Bu doğrultuda, modelde kullanılan tüm seriler için iki farklı birim kök testi, ADF ve RALS-ADF, uygulanmıştır. Bu testlerden elde edilen bulgular Tablo 3'te sunulmaktadır.

Tablo 3: Birim Kök Test Sonuçları

Değişkenler	RALS-ADF				ADF	
	I(0)		I(1)		I(0)	I(1)
	Test	ρ_2	Test	ρ_2		
lnCO2	-3.019 (0)	0.9	-5.136 (0)*	0.8	-3.395	-6.249*
lnFD	-2.517(0)	0.5	-4.959(0)*	0.5	-1.609	-4.488
lnPGDP	-2.474 (0)	0.5	-8.178 (9)*	0.5	-2.192	-6.159*
lnTEC	-2.701 (13)	0.5	-6.871 (12)*	0.5	-2.789	-4.628*
Not: (1) *, ** ve *** sırasıyla %1, %5 ve %10'daki önemi temsil etmektedir. (2) Parantez içindeki sayılar, yinelemeli t istatistikleri kullanılarak belirlenen optimum gecikme uzunluğunu gösterir. (3) ADF testi için %1, %5 ve %10 kritik değerleri sırasıyla - 4.23, - 3.54 ve - 3.20'dir. (4) RALS-ADF testi için %1, %5 ve %10 kritik değerleri sırasıyla - 3.88, -3.33 ve - 3.04'tir						

Tablo 3'te verilen birim kök testi sonuçlarına göre, karbon salınımı, finansal gelişme, ekonomik büyüme ve teknolojik yenilik değişkenlerinin hiçbirisi seviye düzeyinde durağan değildir. Ancak, her bir değişkenin birinci farkı alındığında, hem RALS-ADF hem de klasik ADF testlerine göre %1 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar bulunmuştur. RALS-ADF testi, geleneksel ADF'ye kıyasla daha güçlü sonuçlar vermiştir. Bu bulgular, değişkenlerin seviye değerlerinde birim kök içerdiğini ve birinci farkları alındığında durağan hale geldiklerini, başka bir deyişle I(1) sürecine sahip olduklarını göstermektedir. Uygulanan modelin tutarlılığını test etmek amacıyla otokorelasyon, değişen varyans ve normal dağılım varsayımlarının incelenmesi gerekmektedir. Modelin tanımlayıcı istatistikleri Tablo 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4: Tanımlayıcı İstatistikler

İstatistikler	lnCO2	lnFD	lnPGDP	lnTEC
Ortalama	5.464	3.304	17.75	7.689
Medyan	5.452	3.04	17.528	7.564
Maksimum	6.115	4.261	19.013	9.054
Minimum	4.553	2.64	16.711	6.385
Standart Sap.	0.441	0.567	0.684	0.831
Skewness	-0.295	0.555	0.297	0.231
Kurtosis	2.02	1.667	1.814	1.782
Jarque-Bera	Logaritmik Veriler	2.073	2.769	2.785
		0.355	0.253	0.248
	Ham Veriler	2.593	5.925	6.281
		0.273	0.052	0.043

Tablo 4'te, çalışmada kullanılan değişkenlere ilişkin tanımlayıcı istatistikler; ortalama, medyan, maksimum ve minimum değerler ile standart sapma, çarpıklık, basıklık ve Jarque-Bera testi sonuçları yer almaktadır. Çarpıklık değerleri, lnCO₂'nin (-0.295) hafif sola, diğer değişkenlerin ise sağa çarpık dağıldığını göstermektedir. Basıklık değerleri tüm değişkenlerde 3'ün altında kalmış, bu da serilerin normal dağılıma kıyasla daha basık bir yapıya sahip olduklarını ortaya koymuştur. Jarque-Bera test istatistikleri incelendiğinde, logaritmik veriler kullanıldığında tüm değişkenlerde p-değerleri 0.05'in üzerinde çıkmış ve normal dağılım varsayımı reddedilememiştir. Buna karşılık, ham veriler kullanıldığında yalnızca lnCO₂ için p-değeri 0.273 olup normal dağılıma uygunluk sağlanırken; lnFD (p=0.052), lnPGDP (p=0.043) ve lnTEC (p=0.032) değişkenlerinde normal dağılımdan sapma gözlenmiştir. Bu bulgular, logaritmik dönüşümün serilerin dağılımsal özelliklerini iyileştirdiğini ve normal dağılıma daha uygun hale getirdiğini göstermektedir.

Tablo 5: Eşbütünleşme Testi Sonuçları

Method	k	Test İstatistiği	p2
RALS-EG	2	-6.725	0.282
Bayer Hanck (2012)	EG-J:	55.311	
	EG-J-Ba-Bo	58.437	
Not: *, ** ve *** sırasıyla %1, %5 ve %10'daki önemi temsil etmektedir. RALS-EG için %1, %5 ve %10 anlamlılık düzeyi kritik değerleri -4,88, -4.27 ve -3.93'tür. EG-J için 16.263, 10.711, 8.352 EG-J-Ba-Bo için 31.742, 20.788, 16.239			

Tablo 5'te Engle-Granger (EG) ve Residual Augmented Least Squares Engle-Granger (RALS-EG) eşbütünleşme testlerinin sonuçları sunulmaktadır. Hem geleneksel EG testi (-3.843) hem de daha gelişmiş bir yöntem olan RALS-EG testi (-6.737), %1 anlamlılık düzeyinde seriler arasında eşbütünleşme bulunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle RALS-EG testinin daha yüksek bir test istatistiği üretmesi, değişkenler arasındaki uzun dönemli ilişkinin daha güçlü olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca p² değerinin 0.375 çıkması, modelin orta düzeyde açıklayıcı güce sahip olduğunu göstermektedir. Genel olarak, elde edilen bulgular seriler arasında anlamlı bir denge ilişkisi bulunduğunu ve hata düzeltme modelleri gibi yöntemlerin uygulanabilirliğini desteklemektedir. Kritik değerlerle karşılaştırıldığında her iki test istatistiğinin de eşikleri aşması, sonuçların güvenilirliğini teyit etmektedir.

Tablo 6: Uzun Vadeli Tahmin (FMOLS)

Değişkenler	Katsayı	Stn. Sapma	t istatistiği	p
lnFD	-0.337	0.072	-4.660	0.000*
lnPGDP	0.783	0.071	11.039	0.000*
lnTEC	0.074	0.043	1.720	0.094***
Sabit	-7.885	0.937	-8.409	0.000*

Not: (1) *, ** ve *** sırasıyla %1, %5 ve %10'daki önemi temsil etmektedir.

Tablo 6’da FMOLS (Tam Modifiye Edilmiş En Küçük Kareler) uzun dönem tahmin sonuçları sunulmaktadır. Bulgulara göre, kişi başına GSYH’deki %1’lik artış emisyonları %0.783 oranında artırmakta, bu da ekonomik büyümenin karbon salınımını tetikleyen en güçlü faktör olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, ekonomik büyümenin CO₂ emisyonlarını artırdığını ortaya koyan önceki çalışmalarla (Osobajo vd. 2020; Raihan ve Tuspekova 2022; Sikder vd. 2022) uyumludur. Buna karşılık, finansal gelişmedeki %1’lik artış emisyonları %0.337 oranında azaltmakta olup, bu bulgu Sarkodie ve Strezov (2019), Wang ve Zhang (2022) ve Song, Mao, ve Han (2021) tarafından elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir. Teknolojik yeniliklerdeki %1’lik artış ise emisyonları %0.074 oranında artırmakta ve bu etki yalnızca %10 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu durum, Türkiye’de teknolojik yeniliklerin henüz çevresel sürdürülebilirlik odaklı değil, daha çok üretim ve sanayi kapasitesini artırmaya yönelik geliştiğini düşündürmektedir. Ancak literatürde bu değişkenin emisyon üzerindeki etkisine ilişkin farklı bulgular mevcuttur: Wahab (2021), Wang vd. (2022) ve Su vd. (2023) teknolojik yeniliklerin emisyon düzeyini artırdığını öne sürerken; (Cheng vd. 2020), Adebayo vd. (2023) ve Chen ve Lee (2020) teknolojik yeniliklerin emisyonları azalttığını belirtmiştir. Genel olarak sonuçlar, düşük karbonlu büyüme hedeflerine ulaşabilmek için finansal gelişmenin yeşil yatırımlar yönünde teşvik edilmesi ve teknolojik yeniliklerin çevresel boyutunun güçlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Tablo 7: Tanı Testleri Sonuçları

Testler	X ² (p değeri)	Sonuç
Breusch-Godfrey LM	0.736	Otokorelasyon sorunu yok
Breusch-Pagan-Godfrey	0.429	Değişen varyans sorunu yok
ARCH	0.685	Değişen varyans sorunu yok
Ramsey RESET testi	0.142	Model uygun
Jarque Bera	0.545	Normal dağılım

Tablo 7’de modelin varsayımlarını değerlendirmek için uygulanan tanı testlerinin sonuçları sunulmaktadır. Elde edilen bulgulara göre otokorelasyon (Breusch-Godfrey LM), değişen varyans (Breusch-Pagan), ARCH etkisi, fonksiyonel form hatası (Ramsey RESET) ve normallik varsayımı (Jarque-Bera) açısından herhangi bir sorun bulunmamıştır. Bu sonuçlar, modelin ekonometrik varsayımları karşıladığını ve tahminlerin güvenilir olduğunu göstermektedir.

Tablo 8: Nedensellik Testi Sonuçları

Nedensellik Yolu	Wald-Test İstatistiği	Olasılık	Sıklık
LnFD=>LnCO₂	33.821	0.000*	3
LnCO₂=>LnFD	35.421	0.000*	1
LnPGDP=>LnCO₂	32.552	0.000*	2
LnCO₂=>LnPGDP	49.638	0.000*	1
LnTEC=>LnCO₂	6.682	0.010**	1
LnCO₂=>LnTEC	25.750	0.000*	1

Not: (1) *, ** ve *** sırasıyla %1, %5 ve %10’daki önemi temsil etmektedir.

Tablo 8’de Enders ve Jones (2016) tarafından literatüre kazandırılan Fourier tabanlı Granger nedensellik testi uygulanmış ve sonuçları sunulmuştur. Bulgular, CO₂ emisyonu (LnCO₂) ile finansal gelişme (LnFD), kişi başına düşen gelir (LnPGDP) ve teknolojik ilerleme (LnTEC) arasında güçlü nedensellik ilişkileri bulunduğunu ortaya koymaktadır. Analiz, finansal gelişme ve ekonomik büyüme ile emisyonlar arasında çift yönlü bir nedensellik olduğunu, bunun da karşılıklı etkileşimleri yansıttığını göstermektedir. Teknoloji değişkeninde ise asimetric bir yapı gözlenmiş; CO₂ emisyonundan teknolojiye doğru daha güçlü bir nedensellik tespit edilmiştir. Genel olarak bu sonuçlar, çevresel baskılar ile ekonomik ve teknolojik dinamiklerin birbirini karşılıklı olarak şekillendirdiğine işaret etmektedir.

5. Sonuç

Bu çalışmada 1984–2021 dönemi için Türkiye’de ekonomik büyüme, finansal gelişme ve teknolojik yeniliklerin karbon emisyonları üzerindeki uzun dönemli etkileri incelenmiştir. Bulgular, ekonomik büyümenin emisyonları en güçlü biçimde artıran faktör olduğunu göstermektedir. Bu durum, Türkiye’nin büyüme sürecinde enerji-yoğun üretim yapısına ve fosil yakıtlara yüksek bağımlılığına işaret etmektedir. Nitekim büyümenin erken aşamalarında çevresel maliyetlerin artması, Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) hipotezinin ilk fazıyla örtüşmektedir. Literatürde de benzer biçimde, ekonomik büyümenin emisyonları artırıcı etkisi birçok çalışmada doğrulanmıştır (Khalid vd. 2023; Pata 2018; Sikder vd. 2022). Çalışmada finansal gelişmelerin (FD) karbon emisyonlarını istatistiksel olarak anlamlı ve pozitif yönde etkilediği görülmüştür. Bu bulgu, özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde yabancı sermayenin genellikle sanayi ve enerji-yoğun sektörlere yöneldiği gerçeğiyle uyumludur. Teknolojik yeniliklerin etkisi ise farklı yönlerde gözlemlenmiştir. FMOLS sonuçları bu ilişkinin daha sınırlı ve anlamlılık düzeyinde değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, teknolojik yeniliklerin niteliğine bağlı olarak hem kirletici (örneğin sanayileşmeye dayalı) hem de temizleyici (örneğin yeşil teknolojiler) etkiler yaratabileceğini göstermektedir.

Finansal gelişmenin emisyonlar üzerinde negatif etkiye sahip olması ise Türkiye’de finansal sistemin çevreci yatırımların finansmanında belirli ölçüde işlev gördüğünü göstermektedir. Bankacılık sektörünün yeşil finansman ürünleri, enerji verimliliği kredileri ve yenilenebilir enerji yatırımlarına sağladığı finansman bu bulgunun arkasındaki olası mekanizmalardır. Ancak Türkiye’de finansal piyasaların görece sınırlı derinliğe sahip olması, bu etkinin daha güçlü hale gelebilmesi için politika desteğine ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Teknolojik yeniliklerin emisyonlar üzerindeki pozitif ancak sınırlı etkisi, Türkiye’de yenilik faaliyetlerinin büyük ölçüde sanayi üretimine ve enerji-yoğun sektörlere yönelik olduğunu düşündürmektedir. Bu bulgu, inovasyonun niteliğinin çevresel sonuçlar açısından belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Eğer Ar-Ge faaliyetleri doğrudan yeşil teknolojilere ve temiz üretim süreçlerine yönlendirilmezse, teknolojik ilerleme kısa vadede emisyonları azaltıcı bir etki göstermeyebilmektedir.

Nedensellik analizinde, ekonomik büyüme ve finansal gelişme ile emisyonlar arasında çift yönlü bir nedensellik ilişkisi bulunmuş, bu da ekonomi-çevre etkileşiminin karşılıklı bir süreç olduğunu göstermiştir. Emisyonlar ile teknoloji arasında gözlenen asimetric nedensellik ise çevresel baskıların inovasyonu tetikleyebildiğini, ancak bu inovasyonun her zaman çevreci nitelikte olmadığını ortaya koymaktadır.

Genel olarak bulgular, Türkiye’nin sürdürülebilir büyüme hedefleri için üç temel politika çıkarımı sunmaktadır: (i) enerji politikalarının düşük karbonlu üretim ve yenilenebilir kaynaklar etrafında yeniden yapılandırılması, (ii) finansal sistemin yeşil yatırımları destekleyecek şekilde daha güçlü düzenlemelerle yönlendirilmesi, (iii) teknolojik yeniliklerin çevre dostu Ar-Ge faaliyetleri aracılığıyla teşvik edilmesi. Bu çerçevede, çalışmanın sonuçları sadece mevcut literatüre katkı sunmakla kalmamakta, aynı zamanda Türkiye’nin uzun vadeli iklim ve kalkınma politikalarına somut bir yol haritası da önermektedir. Bunların yanı sıra, fosil yakıtlara aşırı bağımlı olan Türkiye’nin karbon emisyonu oranını yakın gelecekte düşürmesi makul bir hedef olarak görülmektedir. Ancak bu hedefin gerçekleştirilebilir olması için, fosil yakıtlara dayalı enerji bağımlılığının azaltılması ve teknolojik ilerlemelerin yeşil kalkınma hedefli olması gerekmektedir. Ayrıca yabancı yatırımların çevreye duyarlı ve sürdürülebilirliği ön planda tutan alanlara yönlendirilmesi, çevresel sorunların bir ölçüde giderilmesine katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Öncelikle, kullanılan veri seti 1984–2021 dönemiyle sınırlıdır ve daha güncel yılları kapsayacak şekilde genişletilmesi sonuçların genellenebilirliğini artırabilir. İkinci olarak, analizde kullanılan değişkenler makroekonomik düzeyde ele alınmıştır; sektörel farklılıkların dikkate alınmaması bulguların ayrıntılı yorumlanmasını sınırlamaktadır. Ayrıca, çalışmada yalnızca FMOLS yöntemiyle uzun dönem katsayıları tahmin edilmiş olup, farklı tahmincilerle yapılacak karşılaştırmalar metodolojik çeşitlilik açısından faydalı olabilir. Son olarak, Fourier tabanlı nedensellik testi kısa ve uzun dönem nedensellik ilişkilerini açıklamada güçlü olsa da yapısal kırılmaların daha ayrıntılı şekilde modellenmesi, gelecekteki çalışmalar için önemli bir katkı sağlayabilir.

Destek ve Teşekkür Beyanı: Bu araştırmanın hazırlanmasında herhangi bir dış destek alınmamıştır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı: Bu çalışma tek yazarlı olup yazarın katkı oranı %100'dür.

Çatışma Beyanı: Bu çalışma tek yazarlı olup çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı: Bu araştırmanın her aşamasında “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi”nde belirtilen tüm kurallara uyulmuştur. Yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirisi gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışmanın yazım sürecinde etik kurallarına uygun alıntı yapılmış ve kaynakça oluşturulmuştur. Çalışma intihal denetimine tabi tutulmuştur.

Kaynakça

- 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 and renewable energy consumption, and natural resources in limiting carbon emission. *The Science of the Total Environment*, 859, 160181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160181>
- Boutabba, M. A. (2014). The impact of financial development, income, energy and trade on carbon emissions: Evidence from the Indian economy. *Economic Modelling*, 40, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2014.03.005>
- British Petroleum. (2025). British Petroleum. Erişim adresi: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics.html>
- Cai, A., Zheng, S., Cai, L. H., Yang, H., & Comite, U. (2021). How does green technology innovation affect carbon emissions? A spatial econometric analysis of China's provincial panel data. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 813811. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.813811>
- Chen, J., Gao, M., Mangla, S. K., Song, M., & Wen, J. (2020). Effects of technological changes on China's carbon emissions. *Technological Forecasting and Social Change*, 153, 119938. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119938>
- Chen, Y., & Lee, C. C. (2020). Does technological innovation reduce CO2 emissions? Cross-country evidence. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121550. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121550>
- Cheng, C., Ren, X., Dong, K., Dong, X., & Wang, Z. (2020). How does technological innovation mitigate CO2 emissions in OECD countries? Heterogeneous analysis using panel quantile regression. *Journal of Environmental Management*, 280, 111818. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111818>
- Destek, M. A., & Manga, M. (2021). Technological innovation, financialization, and ecological footprint: Evidence from BEM economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 21991. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11845-2>
- Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1981). Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica*, 49(4), 1057–1072.

- Doğan, B. Ö. (2023). Ekolojik sürdürülebilirlikte finansal gelişme ve teknolojik inovasyon etkisi: Türkiye'den kanıtlar. *Akademik Hassasiyetler*, 10(23), 200–217. <https://doi.org/10.58884/AKADEMIKHASSASIYETLER.1331306>
- Enders, W., & Jones, P. (2016). Grain prices, oil prices, and multiple smooth breaks in a VAR. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, 20(4), 399–419. <https://doi.org/10.1515/SNDE-2014-0101>
- Engle, R. F., & Granger, C. W. J. (1987). Co-integration and error correction: Representation, estimation and testing. *Econometrica*, 55(2), 251–276.
- Erdoğan, S. (2021). Dynamic nexus between technological innovation and buildings sector's carbon emission in BRICS countries. *Journal of Environmental Management*, 293, 112780. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112780>
- Erdoğan, S., Yıldırım, S., Yıldırım, D. Ç., & Gedikli, A. (2020). The effects of innovation on sectoral carbon emissions: Evidence from G20 countries. *Journal of Environmental Management*, 267, 110637. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110637>
- Fernández Fernández, Y., Fernández López, M. A., & Olmedillas Blanco, B. (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>
- Ganda, F. (2019). The impact of innovation and technology investments on carbon emissions in selected OECD countries. *Journal of Cleaner Production*, 217, 469–483. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.235>
- Gonenc, H., & Poleska, A. (2023). Multinationals, research and development, and carbon emissions: International evidence. *Climate Policy*, 23(8), 959–974. <https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2135484>
- Granger, C. W. J. (1969). Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica*, 37(3), 424–438.
- Gültekin, H. (2023). Finansal gelişme, inovasyon ve CO2 emisyonları: ARDL sınır testi yaklaşımı. *Econder Uluslararası Akademik Dergi*, 7(1), 25–39. <https://doi.org/10.35342/ECONDER.1269394>
- Im, K. S., & Schmidt, P. (2008). More efficient estimation under non-normality when higher moments do not depend on the regressors, using residual augmented least squares. *Journal of Econometrics*, 144(1), 219–233.
- Jiang, C., & Ma, X. (2019). The impact of financial development on carbon emissions: A global perspective. *Sustainability*, 11(19), 5241. <https://doi.org/10.3390/su11195241>
- Khalid, T., Wen, J., Khalid, M., Khalid, S., Zakaria, M., & Mahmood, H. (2023). Does technological innovation reduce environmental degradation? Evidence from China. *Engineering Economics*, 34(3), 323–334. <https://doi.org/10.5755/j01.ee.34.3.32818>
- Khan, I., Hou, F., & Le, H. P. (2021). The impact of natural resources, energy consumption, and population growth on environmental quality: Fresh evidence from the United States of America. *Science of the Total Environment*, 754, 142222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142222>
- Koçak, E. (2024). Çevresel teknolojik inovasyonun küresel ısınma üzerindeki etkisine ilişkin bir inceleme: Türkiye'den kanıtlar. *Fiscaeconomia*, 8(2), 478–494. <https://doi.org/10.25295/fsecon.1405227>

- Lau, C. K., Patel, G., Mahalik, M. K., Sahoo, B. K., & Gozgor, G. (2024). Effectiveness of fiscal and monetary policies in promoting environmental quality: Evidence from five large emerging economies. *Emerging Markets Finance and Trade*, 60(1), 203–215. <https://doi.org/10.1080/1540496x.2023.2210716>
- Lee, H., Lee, J., & Im, K. (2015). More powerful cointegration tests with non-normal errors. *Studies in Nonlinear Dynamics and Econometrics*, 19(4), 397–413. <https://doi.org/10.1515/SNDE-2013-0060>
- Liu, Y., Tang, L., & Liu, G. (2022). Carbon dioxide emissions reduction through technological innovation: Empirical evidence from Chinese provinces. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15), 9543. <https://doi.org/10.3390/ijerph19159543>
- Osobajo, O. A., Otitoju, A., Otitoju, M. A., & Oke, A. (2020). The impact of energy consumption and economic growth on carbon dioxide emissions. *Sustainability*, 12(19), 7965. <https://doi.org/10.3390/su12197965>
- Our World in Data. (2024). Per capita CO₂ emissions. Erişim adresi: <https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-per-capita?tab=chart&time=1960..latest&country=~TUR>
- 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>
- Petrović, P., & Lobanov, M. M. (2020). The impact of R&D expenditures on CO₂ emissions: Evidence from sixteen OECD countries. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119187. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119187>
- Qayyum, M., Ali, M., Nizamani, M. M., Li, S., Yu, Y., & Jahanger, A. (2021). Nexus between financial development, renewable energy consumption, technological innovations and CO₂ emissions: The case of India. *Energies*, 14(15), 4505. <https://doi.org/10.3390/en14154505>
- Raihan, A., & Tuspekova, A. (2022). The nexus between economic growth, renewable energy use, agricultural land expansion, and carbon emissions: New insights from Peru. *Energy Nexus*, 6, 100067. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100067>
- Sagar, A. D., & van der Zwaan, B. (2006). Technological innovation in the energy sector: R&D, deployment, and learning-by-doing. *Energy Policy*, 34(17), 2601–2608. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.04.012>
- Sarkodie, S. A., & Strezov, V. (2019). Effect of foreign direct investments, economic development and energy consumption on greenhouse gas emissions in developing countries. *The Science of the Total Environment*, 646, 862–871. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.365>
- Shahbaz, M., Solarin, S. A., Hammoudeh, S., & Shahzad, S. J. H. (2017). Bounds testing approach to analyzing the environment Kuznets curve hypothesis with structural breaks: The role of biomass energy consumption in the United States. *Energy Economics*, 68, 548–565. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.10.004>
- Sheraz, M., Deyi, X., Ahmed, J., Ullah, S., & Ullah, A. (2021). Moderating the effect of globalization on financial development, energy consumption, human capital, and carbon emissions: Evidence from G20 countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 35126–35144. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13116-0>

- Shoaib, H., Rafique, M. Z., Nadeem, A. M., & Huang, S. (2020). Impact of financial development on CO2 emissions: A comparative analysis of developing countries (D8) and developed countries (G8). *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 12461–1275. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06680-z>
- Sikder, M., Wang, C., Yao, X., Huai, X., Wu, L., Yeboah, F. K., Wood, J., Zhao, Y., & Dou, X. (2022). The integrated impact of GDP growth, industrialization, energy use, and urbanization on CO2 emissions in developing countries: Evidence from the panel ARDL approach. *Science of The Total Environment*, 837, 155795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155795>
- Song, W., Mao, H., & Han, X. (2021). The two-sided effects of foreign direct investment on carbon emissions performance in China. *The Science of the Total Environment*, 791. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148331>
- Su, L., Ji, T., Ahmad, F., Chandio, A. A., Ahmad, M., Jabeen, G., & Rehman, A. (2023). Technology innovations impact on carbon emission in Chinese cities: Exploring the mediating role of economic growth and industrial structure transformation. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(16), 46321–46335. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25493-9>
- Şeyranlioğlu, O. (2024). Türkiye’de finansal gelişmenin karbon (CO2) emisyonlarına etkisi: Çevresel Kuznets eğrisi hipotezi çerçevesinde sektörel bir bakış. *Sosyoekonomi*, 32(61), 427–454. <https://doi.org/10.17233/sosyoekonomi.2024.03.20>
- Toda, H. Y., & Yamamoto, T. (1995). Statistical inference in vector autoregressions with possibly integrated processes. *Journal of Econometrics*, 66(1–2), 225–250. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(94\)01616-8](https://doi.org/10.1016/0304-4076(94)01616-8)
- Tsimisaraka, R. S. M., Xiang, L., Andrianarivo, A. R. N. A., Josoa, E. Z., Khan, N., Hanif, M. S., Khurshid, A., & Limongi, R. (2023). Impact of financial inclusion, globalization, renewable energy, ICT, and economic growth on CO2 emission in OBOR countries. *Sustainability*, 15(8), 6534. <https://doi.org/10.3390/su15086534>
- Tufail, M., Song, L., Adebayo, T. S., Kirikkaleli, D., & Khan, S. (2021). Do fiscal decentralization and natural resources rent curb carbon emissions? Evidence from developed countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(35), 49179–49190. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13865-y>
- UNFCCC. (2015). UNFCCC. Erişim adresi: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/202206/The_INDC_of_TURKEY_v.15.19.30.pdf
- Wahab, S. (2021). Does technological innovation limit trade-adjusted carbon emissions? *Environmental Science and Pollution Research*, 28(28), 38043–38053. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13345-3>
- Wang, F., Fan, W., Liu, J., Wang, G., & Chai, W. (2020). The effect of urbanization and spatial agglomeration on carbon emissions in urban agglomeration. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(19), 24329–24341. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08597-4>
- Wang, Q., & Zhang, Q. (2022). Foreign direct investment and carbon emission efficiency: The role of direct and indirect channels. *Sustainability*, 14(20), 13484. <https://doi.org/10.3390/su142013484>
- Wang, W. Z., Liu, L. C., Liao, H., & Wei, Y. M. (2021). Impacts of urbanization on carbon emissions: An empirical analysis from OECD countries. *Energy Policy*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112171>
- Wang, Z., Gao, L., Wei, Z., Majeed, A., & Alam, I. (2022). How FDI and technology innovation mitigate CO2 emissions in high-tech industries: Evidence from province-level data of China.

Environmental Science and Pollution Research, 29(3), 4641–4653.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-15946-4>

World Bank. (2025). World Bank Data. Erişim adresi: <https://data.worldbank.org/>

Yağış, O. (2024). Türkiye’de teknolojik yenilikler ve ekonomik büyümenin çevre kalitesi üzerindeki etkileri: ARDL sınır testi. *Journal of Abant Social Sciences*, 24(1), 103–117.
<https://doi.org/10.11616/asbi.1391389>

Zhang, M., Li, B., & Yin, S. (2020). Is technological innovation effective for energy saving and carbon emissions reduction? Evidence from China. *IEEE Access*, 8, 83524–83537.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990678>

Zhao, J., Shahbaz, M., Dong, X., & Dong, K. (2021). How does financial risk affect global CO2 emissions? The role of technological innovation. *Technological Forecasting and Social Change*. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120751>