



Uluslararası Akademik Yönetim Bilimleri Dergisi

Uluslararası Akademik Yönetim Bilimleri Dergisi (<http://dergipark.gov.tr/yonbil>)
2025, Cilt 11, Sayı 18

YEŞİL AR-GE YATIRIMLARI, YEŞİL TEKNOLOJİ VE ÇEVRE KİRLİLİĞİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ: G7 ÜLKELERİ ÖRNEĞİ

AN INVESTIGATION INTO THE RELATIONSHIP BETWEEN GREEN R&D INVESTMENTS, GREEN TECHNOLOGY, AND ENVIRONMENTAL POLLUTION: THE CASE OF G7 COUNTRIES

Yağmur GÜNEY¹

Feyyaz ZEREN^{2*}

Özet

Çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında, yenilikçi yeşil teknolojilerin ve yeşil Ar-Ge faaliyetlerinin rolü her geçen gün daha kritik hale gelmektedir. Bu çalışmada G7 ülkelerinde yeşil Ar-Ge yatırımları ve yeşil teknoloji inovasyonunun çevresel etkilerinin panel veri analizleri aracılığıyla incelenmesi amaçlanmaktadır. 1990-2022 dönemine ait yıllık veriler kullanılarak yatay kesit bağımlılığı, homojenlik ve eş bütünleşme ilişkileri dikkate alınarak ikinci nesil panel veri yöntemleri uygulanmıştır. Bu doğrultuda uygulanan Durbin-Hausman (2008) ile Westerlund-Edgerton (2007) panel eş bütünleşme testleri yeşil Ar-Ge yatırımları ve çevre kirliliği arasında uzun dönemli bir ilişki olduğunu ortaya koyarken yeşil teknoloji ve çevre kirliliği arasında ise anlamlı bir ilişkiye rastlanmamıştır. Ülke bazlı tahmin sonuçları yeşil Ar-Ge yatırımlarının çevresel etkilerinin ülkeler arasında önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle Almanya dışındaki birçok G7 ülkesinde çevre kirliliğini artırıcı yönde bulguların ortaya çıktığı görülmüştür. Bu bulgular, yeşil yatırımların çevresel etkinliğinin yalnızca yatırım miktarına değil, aynı zamanda yapısal koşullar, düzenleyici çerçeve ve yönetim kalitesine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Nihai olarak elde edilen bulgular, politika yapıcılara ülkeye özgü stratejiler geliştirme konusunda önemli çıkarımlar sunmakta ve yeşil inovasyonun çevresel faydalarını en üst düzeye çıkarmak için kurumsal ve teknik altyapının güçlendirilmesinin gerekliliğine işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yeşil Ar-Ge Yatırımları, Yeşil Teknoloji, Çevre Kirliliği, G7 ülkeleri, Panel Veri Analizi

Abstract

The role of innovative green technologies and green R&D activities is becoming increasingly critical in achieving environmental sustainability. This study aims to examine the environmental impacts of green R&D investments and green technology innovation in G7 countries through panel data analysis. Utilizing annual data from 1990 to 2022, second-generation panel data methods were applied, considering cross-sectional dependency, homogeneity, and cointegration relationships. The Durbin-Hausman (2008) and Westerlund-Edgerton (2007) panel cointegration tests revealed a long-term relationship between green R&D investments and environmental pollution, while no significant relationship was found between green technology and environmental pollution. Country-specific

¹ yagmurg79@gmail.com, Yalova Üniversitesi, ORCHID ID: 0009-0000-1683-4585

² feyyaz.zeren@yalova.edu.tr, Yalova Üniversitesi, ORCHID ID: 0000-0003-0163-5916

estimation results indicate significant variations in the environmental impacts of green R&D investments across countries. Notably, findings suggest that in many G7 countries, except Germany, green R&D investments tend to increase environmental pollution. These results demonstrate that the environmental effectiveness of green investments depends not only on the amount of investment but also on structural conditions, regulatory frameworks, and governance quality. The study provides significant insights for policymakers in developing country-specific strategies and highlights the necessity of strengthening institutional and technical infrastructure to maximize the environmental benefits of green innovation.

Key Words: Green R&D Investigations, Green Technology, Environmental Pollution, G7 Countries, Panel Data Analysis

GİRİŞ

Günümüzde çevresel tahribat, insanlığın sürdürülebilir kalkınma hedeflerini tehdit eden en ciddi küresel sorunlardan biri olarak öne çıkmaktadır (Alamsyah ve Muhammad, 2019). Özellikle sera gazı emisyonlarındaki artış, ekosistemlerin dengesini bozarak küresel ısınmayı hızlandırmakta, biyolojik çeşitliliği tehlikeye atmakta ve ekonomik istikrar üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır (Adedoyin vd., 2020; Farooq vd., 2019). CO₂ emisyonları, hava kirliliğinin başlıca nedeni olarak kabul edilmekte olup, küresel ısınma ve çevresel bozulmanın en önemli etkenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Telatar ve Birinci, 2022). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2019 verilerine göre, dünya genelindeki karbon emisyonları 33.621,5 Mt seviyesine ulaştığı görülmektedir (Chen vd., 2023).

İklim değişikliğinin yıkıcı etkileri, 2015 yılında düzenlenen Taraflar Konferansı'nda (COP21) kabul edilen Paris İklim Anlaşması ile küresel ölçekte ele alınmış ve çözüm odaklı adımlar atılmaya başlanmıştır (Pachauri vd., 2014). Bu anlaşma kapsamında, karbon emisyonlarının 2020 yılı civarında zirveye ulaşması ve küresel sıcaklık artışının 2°C'nin altında tutulması temel hedefler arasında yer almıştır. Fakat, sanayileşme ve kentleşmenin hızla ilerlemesi, enerji talebinde büyük bir artışa sebep olmaktadır. Bu durum fosil yakıt tüketiminin yükselmesine yol açarak CO₂ emisyonlarının kontrol altına alınmasını zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda, yeşil teknoloji inovasyonu ve Ar-Ge yatırımları, karbon salınımını azaltarak sürdürülebilir kalkınmayı destekleyen en önemli unsur olarak kabul edilmektedir (Karanfil vd., 2024).

Braun ve Wield (1994), yeşil teknoloji kavramını ilk kez ortaya atarak, bu teknolojinin kirlilik kontrolü, ekolojik arıtma, saflaştırma, geri dönüşüm, izleme ve çeşitli değerlendirme teknolojilerini içermesi gerektiğini ileri sürmüştür. Ancak, akademik çevrelerde "yeşil inovasyon" kavramının kesin bir tanımı üzerinde henüz tam bir uzlaşma sağlanamamıştır.

Günümüzde, inovasyon, yenilikçilik, değer yaratma, kaynak verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik unsurlarını içeren her türlü süreç veya ürün, "yeşil inovasyon" olarak nitelendirilmektedir (Lin ve Long, 2021). Yeşil inovasyonun yaygınlaşması, özellikle teknoloji ve sanayi sektörlerinde sürdürülebilir yenilikler geliştirerek CO2 emisyonlarını azaltmada etkili bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Yeşil inovasyon ve Ar-Ge yatırımları, ülkelerin karbon salınımını azaltma sürecinde yenilikçi teknolojilerin gelişimini desteklemesi açısından büyük bir öneme sahiptir. Özellikle gelişmiş ülkelerde, yeşil inovasyon politikaları ve bu alana yapılan yatırımlar, CO2 emisyonlarını düşürme konusunda etkili bir strateji olarak değerlendirilmektedir (Usman & Makhdum, 2021; Ramzan vd., 2022). Örneğin, Birleşik Krallık'ta faaliyete geçen Yeşil Yatırım Bankası, çevre dostu işletmelere finansal destek sağlayarak sürdürülebilir projelerin ve düşük karbonlu teknolojilerin geliştirilmesini teşvik etmektedir (Guo vd., 2020).

G7 ülkeleri, gelişmiş ekonomileri ve ileri teknoloji kapasiteleriyle küresel ekonomide önemli bir konuma sahip olsa da CO2 emisyonlarının çevresel etkilerini azaltma sorumluluğunu da taşımaktadır. Almanya, İtalya, Birleşik Krallık, ABD, Kanada, Japonya ve Fransa, karbon salınımını düşürmek için yenilenebilir enerji yatırımları ve çevreci sanayi politikaları gibi yeşil stratejiler uygulamasına rağmen artan enerji talebi ve sanayileşme nedeniyle sürdürülebilir kalkınma açısından zorluklarla karşılaşmaktadır. CO2, yüksek teknoloji üretiminde kritik bir bileşen olmasına rağmen çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında, bu ülkelerin çevre kirliliğini azaltmaya yönelik daha kapsamlı politikalar geliştirmesi gerekmektedir. Geniş finansal kaynakları ve güçlü Ar-Ge altyapıları sayesinde, çevre kirliliğini en aza indirebilecek stratejilerin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır (Sharif vd., 2022).

Bu çalışmada, G7 ülkelerinde yeşil teknoloji inovasyonu, yeşil Ar-Ge yatırımları ve CO2 emisyonları arasındaki ilişki incelenecektir. Araştırmanın temel amacı, yeşil teknoloji inovasyonunun çevre kirliliğini azaltmadaki rolünü anlamak ve sürdürülebilir kalkınma açısından taşıdığı önemi değerlendirmektir. Bu doğrultuda, yeşil Ar-Ge yatırımları, yeşil teknoloji inovasyonu ve CO2 emisyonları temel değişkenler olarak ele alınacak ve 1990-2021 yıllarına ait yıllık veriler kullanılarak ekonometrik analiz gerçekleştirilecektir.

Çalışmanın buradan sonraki ikinci bölümünde, konuyla ilgili literatür taraması yapılacak olup, üçüncü bölümde çalışmada kullanılan yöntem ve veri seti açıklanacaktır. Dördüncü bölümde,

analiz sonuçları ve bulgular değerlendirilecek, beşinci ve son bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilecektir.

1. Literatür Taraması

Çevre kirliliğinin belirleyicileri ve çevresel sürdürülebilirlik bağlamında çevre kirliliğini azaltan veya artıran faktörlere odaklanan birçok araştırma bulunmaktadır (Grossman ve Krueger, 1991). Bu faktörlerden biri olan, Ar-Ge yatırımları, verimliliği artırıcı teknoloji kullanımı ile çevreye yayılan karbon salınımının azaltabilmektedir. Bu durum iklim değişikliği, gıda ve enerji tüketimi gibi küresel sorunların çözümü adına ülkeler için kritik bir öneme sahiptir. Avrupa Birliği, 2050 yılında sıfır karbon hedefiyle büyük bir dönüşüme imza atmak amacıyla yeşil mutabakatı imzalamıştır. Konuyla ilgili yapılan birçok çalışmada, farklı yöntemlerle farklı sonuçlar elde edilmiştir (Mangır vd., 2022). Bu literatür incelemesinin ilk kısmında yeşil teknolojinin emisyonlar üzerindeki etkisi incelenecektir. Daha sonra ise yeşil büyüme, Ar-Ge harcamaları ve çevresel inovasyon konularına değinilecektir. Son olarak genel literatür değerlendirilmesi yapılacaktır.

Cheng vd. (2021), 35 OECD ülkesi için 1996-2015 dönemi verilerini panel kantil regresyon yöntemiyle analiz ederek, teknolojik inovasyonun CO₂ emisyonlarını doğrudan azaltmanın yanı sıra, ekonomik büyüme ve yenilenebilir enerji kullanımı aracılığıyla dolaylı bir azaltıcı etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık, Majekodunmi vd. (2023), Malezya'ya yönelik 1989-2019 dönemi verileriyle uyguladıkları ARDL modelinde, nüfus artışı ve yeşil teknolojinin emisyonları azalttığını bulurken, ihracat ve ekonomik büyümenin uzun vadede emisyonları artırıcı bir rol oynadığını belirtmiştir. Bu sonuçlar, ekonomik büyümenin her zaman çevresel iyileşme ile paralel gitmediğini gösterirken, Koop (1998) ise 44 ülkeyi kapsayan 1970-1990 dönemi verileriyle yaptığı analizde, yüksek gelirli ülkelerin teknolojik yenilikler sayesinde emisyonlarını azaltabildiğini, ancak düşük gelirli ülkelerin bu süreçte yeterli ilerleme kaydedemediğini saptamıştır.

CarriónFlores ve Innes (2010), ABD'deki 127 imalat sektörü firmasının 1989-2004 dönemi verilerini Panel GMM yöntemiyle inceleyerek, inovasyonun uzun vadede CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkisinin sınırlı kaldığını savunurken, Guo vd. (2018) ise Çin'in 30 şehir 2009-2015 dönemi verileriyle Hausman testi ve sabit-rassal etkiler (FE-RE) analizlerini kullanarak, çevresel düzenlemelerin yeşil teknolojik inovasyonları teşvik edici etkisini ortaya koymuştur.

Sun vd. (2019), 71 gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeyi kapsayan 1990-2014 dönemi verilerini Sınır Fonksiyon Analizi (SFA) ile inceleyerek, özellikle gelişmiş ülkelerde yeşil inovasyonun CO₂ emisyonlarını azaltmakla kalmayıp yenilenebilir enerji kullanımını da optimize ettiğini belirtmiştir. Ancak, Du vd. (2019) 1996-2012 yılları arası için 71 ekonomi üzerinde panel eşik değer modeli, Hausman testi ve sabit etkiler analizleri uygulayarak, inovasyonun etkisinin gelir seviyesine göre farklılaştığını; düşük gelirli ülkelerde emisyonların arttığını, yüksek gelirli ülkelerde ise azaltıcı bir etki gösterdiğini bulmuştur.

Khattak vd. (2020), BRICS ülkelerini analiz ettiği çalışmasında 1980-2016 dönemi verilerini CCEMG, AMG ve Johansson-Fisher panel eşbütünleşme yöntemleriyle inceleyerek, Brezilya hariç Çin, Hindistan, Rusya ve Güney Afrika'da inovasyon faaliyetlerinin CO₂ emisyonlarını azaltmada başarısız olduğunu ortaya koymuştur. Wang vd. (2020) de benzer bir çizgide ilerleyerek, Çin şehirleri 1997-2015 dönemi verileriyle VAR analizini kullanmış ve teknolojik inovasyonun tek başına CO₂ emisyonunu azaltmak için yeterli olmadığını, etkili bir sonuç alabilmek için bu sürecin yeşil yatırımlarla desteklenmesi gerektiğini savunmuştur.

Türkiye özelinde yapılan Shan vd. (2021) çalışması ise, 1990-2018 dönemi verilerini, ARDL ve Granger nedensellik analizleriyle değerlendirerek, yeşil inovasyon ile yenilenebilir enerji kullanımının kısa ve uzun vadede CO₂ emisyonlarını azalttığını bulmuştur. Benzer şekilde, Obobisa vd. (2022), 25 Afrika ülkesine yönelik 2000-2018 dönemi verilerini ikinci nesil panel veri analiz yöntemleri olan AMG, CCEMG, Pedroni ve Westerlund eşbütünleşme testleriyle analiz ederek, yeşil inovasyonların Afrika'da da CO₂ emisyonlarını azaltmada etkili olduğunu göstermiştir.

Hussain vd. (2021), 2000-2020 yılları arasında yüksek gelirli ülkeleri analiz ederek, panel ARDL yöntemiyle yeşil teknolojinin yeşil büyümeyi teşvik ettiğini ve CO₂ emisyonları ile negatif bir ilişkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Fethi ve Rahuma (2019), rafine petrol ihraç eden en büyük 20 ekonomiye yönelik 2007-2016 dönemi verileriyle dinamik ve bağımsız eşbütünleşme testleri uygulamış ve Ar-Ge harcamalarının uzun vadede karbon emisyonları üzerinde negatif bir etkiye sahip olduğunu saptamıştır.

Khan vd. (2020), G7 ülkelerinde 1990-2017 dönemi verileriyle gerçekleştirdikleri analizde, yenilenebilir enerji tüketimi, gelir, çevresel inovasyon ve ticaretin çevre kirliliği ile stabil bir ilişkiye sahip olduğunu bulmuş; uzun vadede çevresel inovasyon, ihracat ve yenilenebilir enerji

tüketiminin çevre kirliliğini azaltmada etkili faktörler olduğunu doğrulamıştır. Bu sonuçlar, Işık ve Kılıç (2014) tarafından da desteklenmiştir. OECD ülkelerini kapsayan 1990-2010 dönemi dinamik panel veri analizinde, enerji alanındaki Ar-Ge harcamalarının CO₂ emisyonlarını azalttığını göstermişlerdir. Aynı çizgide ilerleyen Petrović vd. (2020), 16 OECD ülkesinde 1981-2014 dönemini kapsayan regresyon analizinde, Ar-Ge harcamalarının uzun dönemde CO₂ emisyonları üzerinde genel olarak negatif bir etki yarattığını belirtmiştir. Son olarak, Hashmi ve Alam (2019), OECD ülkeleri için 1994-2014 dönemi verilerini Panel GMM, Driscoll-Kraay panel regresyon analizleriyle inceleyerek, çevre dostu patentlerdeki artışın CO₂ emisyonlarını azaltmada önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur.

Yapılan literatür incelemesi sonucunda, yeşil teknoloji, Ar-Ge yatırımları ve ekonomik büyüme gibi faktörlerin çevre kirliliği üzerindeki etkisini farklı yöntemler ve veri setleri kullanarak ele alındığı görülmektedir. Çalışmalar, yeşil inovasyonun ve yenilenebilir enerji kullanımının emisyonları azaltmada etkili olduğunu, ancak bu etkinin ülkelere ve gelir seviyelerine göre değiştiğini ortaya koymaktadır. Bazı araştırmalar, yeşil teknolojilerin ekonomik büyümeyi teşvik etmesinin yanı sıra emisyonları da azaltabileceğini belirtirken, diğerleri bu ilişkinin doğrudan olmadığını ve uzun vadede değişkenlik gösterebileceğini ifade etmektedir. Genel olarak, yeşil büyüme, Ar-Ge harcamaları ve çevresel inovasyonun sürdürülebilir kalkınmaya katkısı konusunda literatürde farklı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, yeşil teknoloji ve Yeşil Ar-Ge yatırımlarının Çevre Kirliliği üzerindeki etkisini birlikte ele alan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, literatürdeki mevcut boşluğu doldurmak amacıyla, bu çalışmada Yeşil Teknoloji, Yeşil Ar-Ge yatırımları, Çevre Kirliliği arasındaki ilişki incelemiştir.

2. Veri ve Ekonometrik Yöntem

2.1 Veri Seti

Bu çalışmanın veri seti, 1990-2022 dönemine ait G7 ülkelerinin yıllık verilerine dayanmaktadır. Çalışmada çevresel Ar-Ge yatırımları, yeşil teknoloji ve çevre kirliliği arasındaki ilişkiler analiz edilmiştir. Analizde kullanılan değişkenler, uluslararası veri tabanlarından temin edilmiş ve ilgili literatür doğrultusunda tanımlanmıştır. Çalışmada kullanılan temel değişkenlere ilişkin açıklamalar Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1: Değişken Açıklaması

Değişkenler	Sembol	Birim	Kaynak
Çevresel Ar-Ge Yatırımları	ERR& D	Çevre ile ilgili kamu Ar-Ge bütçesi Yüzde (%) (Barak ve Koçoğlu, 2023)	OECD
Yeşil Teknoloji	ENVTECH	Çevresel teknolojiler ile ilgili alınan patent sayıları (Kılınç ve Kılınç, 2024).	OECD
Çevre Kirliliği	CO ₂	Kişi başına düşen Metrik Ton (Akca, 2021)	Our World in Data

Yeşil Ar-Ge harcamaları verileri, 1990 yılı itibarıyla başlamış olduğundan dolayı analiz dönemi bu tarihsel çerçeveye göre belirlenmiştir. Çevre kirliliği değişkeni, "Our World in Data" veri tabanından alınan kişi başına düşen CO₂ emisyonu ile ölçülmüştür. Yeşil Teknoloji değişkeni, OECD veri tabanından alınan çevreyle ilgili patent sayıları ile değerlendirilmiştir. Çevresel Ar-Ge harcamaları değişkeni ise, OECD Yeşil Büyüme veri tabanından elde edilen verilerle, ülkelerin devlet bütçelerinden çevreye yönelik Ar-Ge harcamalarına ayırdığı bütçe yüzdesi kullanılarak ölçülmüştür. Bu değişkenleri aynı şekilde kullanan literatür örnekleri ise Tablo 1'deki birim sütununun altında parantez içerisinde aktarılmıştır.

2.2 Yatay Kesit Bağımlılığı Testi

Son yıllarda panel veri yöntemi giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Bunun temel sebebi, bu yöntemin hem yatay kesit hem de zaman serisi boyutlarını bir arada barındırmasıdır. Panel veri modellerinde, N farklı birim ve her bir birime karşılık gelen T zaman dilimine ait gözlemler bulunmaktadır. Bu iki boyutun birlikte kullanılması, daha kapsamlı veri elde edilmesini sağlarken serbestlik derecesini de artırır. Gözlem sayısındaki artış ise veri setindeki değişkenliği artırarak çoklu doğrusal bağlantı sorununu azaltmada önemli bir rol oynamaktadır (Hsiao, 2006).

Panel veri analizlerinde, yatay kesitler arasındaki olası bağımlılıkların incelenmesi, elde edilecek sonuçların güvenilirliği ve tarafsızlığı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, yatay kesit bağımlılığının tespiti için başvurulan en yaygın yöntemlerden biri, Breusch ve Pagan (1980) tarafından geliştirilen Lagrange Çarpanı (Lagrange Multiplier - LM) testidir. (Ünlü, 2022). Breusch-Pagan (1980) testi, grup ortalamalarının sıfır olduğu durumlarda geçerli sonuçlar üretirken, grup ortalamalarının sıfırdan farklılaştığı durumlarda tutarsız sonuçlara yol açabilmektedir. Bu sınırlılığın giderilmesi amacıyla, Pesaran vd. (2008) tarafından geliştirilen $CDLM_{adj}$ testi, varyans ve ortalama istatistiklerini de dikkate alarak daha sağlam ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Çınar, 2010).

Bu çalışmada 1990-2022 dönemine ait G7 ülkelerine ilişkin panel veri seti kullanıldığından, zaman boyutunun (T) yatay kesit boyutundan (N) büyük olduğu durumlar söz konusudur. Bu nedenle, Breusch ve Pagan (1980) tarafından geliştirilen CDLM testi ile Pesaran, Ullah ve Yamagata (2008) tarafından önerilen $CDLM_{adj}$ testi uygulanmıştır. Söz konusu CDLM ve $CDLM_{adj}$ testlerinin istatistiksel hesaplamaları aşağıda sunulmaktadır:

$$CDLM_{LM} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (T\hat{\rho}_{ij}^2 - 1)}$$
$$CDLM_{adj} = \left(\frac{2}{N(N-1)}\right)^{1/2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \hat{\rho}_{ij}^2 \frac{(T-k-1)\hat{\rho}_{ij}^2 - \hat{\mu}_{Tij}}{v_{ij}^2} N(0,1)$$

2.3 Homojenlik/Heterojenlik Testi

Panel veri analizlerinde kullanılan veri setleri hem yatay kesit hem de zaman serisi boyutu içerdiğinden, sabit etki varsayımı ya da zaman içerisinde tüm birimlerin aynı şekilde etkilendiği homojenite varsayımı genellikle gerçekçi değildir. Özellikle bir dönemde meydana gelen bir şokun tüm kesit birimlerini aynı derecede etkilediği varsayımı uygulamada sınırlayıcı olabilir. Bu nedenle, birimlerin heterojen bir yapıya sahip olup olmadığını test etmek amacıyla Pesaran ve Yamagata (2008) tarafından Delta testi geliştirilmiştir. Söz konusu testin istatistiksel hesaplamaları aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Pesaran & Yamagata, 2008; Göçer, 2013; Sağlam vd., 2017).

$$\tilde{\Delta} = \sqrt{N} \frac{N^{-1}\tilde{S} - k}{\sqrt{2k}}$$

$$\tilde{\Delta}_{adj} = \frac{\sqrt{N}N^{-1}\tilde{S} - k}{\sqrt{Var(T, k)}}$$

Formülde yer alan $\tilde{\Delta}$ ifadesi, küçük örneklem için kullanılan delta test istatistiğini temsil ederken; $\tilde{\Delta}_{adj}$ ise örneklem dikkate alınarak uyarlanmış ve hata terimindeki olası sapmaları hesaba katmak için oluşturulmuş olan düzeltilmiş delta test istatistiğini ifade etmektedir. Ayrıca denklemlerde kullanılan semboller şu şekilde tanımlanır: N , gözlem sayısını; k , modele dahil edilen bağımsız değişkenlerin (açıklayıcı değişkenlerin) sayısını; S , Swamy testine ait istatistiksel değeri ve $Var(T, k)$ ise varyans bileşenini göstermektedir. Delta testi kapsamında kurulan sıfır ve alternatif hipotezler ise şu şekildedir (Pesaran ve Yamagata, 2008; Sağlam vd., 2017):

H₀: $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = \beta$ (yani tüm birimler için katsayılar eşittir)

H₁: $\beta_1 = \beta_2 = \dots \neq \beta_n = \beta$ (en az bir birimde katsayı farklıdır)

Bu hipotez yapısı, panel veride parametrelerin homojen olup olmadığını test etmek için kullanılmaktadır.

2.4 CADF Panel Birim Kök Testi

Çalışmada yatay kesitsel bağımlılık ve parametrelerin homojen olup olmadığını belirlenmesinden sonra, ikinci nesil panel veri analiz yöntemleri ön plana çıkmıştır. Bu çerçevede, Pesaran (2007) tarafından geliştirilen CADF panel birim kök testi uygulanmıştır. Söz konusu test, hem zaman boyutunun yatay kesit boyutundan büyük olduğu durumlarda hem de daha küçük olduğu durumlarda istikrarlı ve güvenilir sonuçlar sağlayabilmektedir. Bu yöntem yatay kesit bağımlılığının ve heterojenliğin bulunduğu durumlarda kullanılmaktadır. Pesaran'ın geliştirdiği bu yöntemde, birimlere özgü CADF test istatistikleri belirli bir formülasyon üzerinden aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır

$$\Delta Y_{it} = \alpha_i + b_i y_{i,t-1} + \sum_{j=1}^{p_i} c_{ij} \Delta Y_{i,t-j} + d_j t + h_i \bar{y}_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{p_i} \eta_{ij} \Delta \bar{y}_{i,t-j} + \varepsilon_{i,t}$$

Panel test istatistiklerinin elde edilme süreci aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir:

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

Burada T zaman serisine ait gözlem sayısını, N ise yatay kesit birimlerinin sayısını temsil etmektedir (Konuk vd., 2021).

2.5 Durbin- Hausman Panel Eşbütünleşme Testi

Modelde yer alan değişkenler arasında uzun vadeli bir ilişki olup olmadığını belirlemek amacıyla panel eşbütünleşme testlerinden faydalanılmaktadır. Böyle bir ilişkinin varlığı durumunda, uzun dönem katsayılarının değerlendirilmesi anlamlı hale gelmektedir. Bu bağlamda Westerlund (2008) tarafından geliştirilen Durbin-H panel eşbütünleşme testi tercih edilmektedir. Söz konusu test, bağımlı değişkenin durağan olmaması ve açıklayıcı değişkenlerin bir kısmının durağan olması hâlinde de uygulanabilir özelliktedir. Testin uygulanmasında, değişkenlerin birinci farkları en küçük kareler yöntemiyle hesaplanmakta, ardından hata terimlerinin ortak bileşenleri temel bileşenler analizine dayalı olarak tahmin edilmektedir. Ayrıca bu test, iki farklı istatistiksel yaklaşım sunmaktadır: İlki, panel birimleri arasında otoregresif katsayının farklılık gösterebileceğini varsayan grup ortalaması istatistiği; diğeri ise tüm kesitlerde katsayının sabit olduğu varsayımıyla hesaplanan panel istatistiğidir. Bu istatistiklerden biri homojendir diğeri ise heterojen grup istatistiğidir. Her iki istatistik de Westerlund'un (2008) önerdiği yöntemsel çerçevede değerlendirilmektedir (Demez, 2021; Altınar ve Toktaş, 2017).

$$DH_g = \sum_{i=1}^n \hat{s}_j (\tilde{\Phi}_i - \check{\Phi}_i \sum_{t=2}^T \hat{e}_{it-1}^2)$$

$$DH_p = \hat{s}_n (\tilde{\Phi} - \check{\Phi})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \hat{e}_{it-1}^2$$

Panel veri analizinde kullanılan grup ve panel ortalaması testleri kapsamında sıfır ve alternatif hipotezler şu şekilde tanımlanmaktadır (Altınar ve Toktaş, 2017):

$H_0: \phi_i = 1$, yani tüm birimler açısından eşbütünleşme mevcut değildir.

H_1^g : $\phi_i \neq \emptyset$ ve $\emptyset < 1$; bu durum, yalnızca bazı birimlerde eşbütünleşmenin varlığını ifade eder.

H_1^p : $\phi_i < 1$; tüm birimlerin eşbütünleşik olduğunu öne sürer.

Her iki testte de ortak sıfır hipotezi, birimlerin tamamında eşbütünleşmenin olmadığı yönündedir. Bununla birlikte, alternatif hipotezlerin anlamları farklılık gösterir: H_1^p hipotezi tüm panel genelinde eşbütünleşme olduğunu savunurken, H_1^g yalnızca belirli birimlerde eşbütünleşmenin olabileceğini belirtir.

2.6 Westerlund ve Edgerton (2007) Panel Eşbütünleşme Testi

Westerlund ve Edgerton (2007) tarafından geliştirilen panel bootstrap eşbütünleşme testi McCoskey ve Kao (1998) tarafından önerilen Lagrange çarpanına (LM) dayanmakta olup, eşbütünleşmenin varlığını test eden sıfır hipotezine sahiptir. Bu test hem yatay kesit bağımlılığı hem de bağımsızlığı durumundaki sonuçları sunmaktadır ve tüm panellerin birinci farklarında durağan olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Testin önemli bir özelliği hem yatay kesitler arası hem de her bir birim içinde korelasyona olanak tanıyan bootstrap yöntemini içermesidir. Eleyici örnekleme yapısına dayanan bu testin, simülasyon bulgularına göre klasik asimptotik testlerde ortaya çıkan sapmaları azalttığı görülmektedir (Özcan ve Arı, 2014).

$$Y_{it} = Z'_{it}\delta_i + X'_{it}\beta_i + \varepsilon_{it} \quad E(\varepsilon_{it}, \varepsilon_{jt}) = 0$$

Kurulan model doğrultusunda panel veri seti için eşbütünleşme ilişkisini test etmek amacıyla hipotezler aşağıdaki biçimde tanımlanmaktadır:

H_0 : Panelde yer alan seriler arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisi vardır.

H_1^p : Panelde yer alan seriler arasında eşbütünleşme ilişkisi bulunmamaktadır. (Westerlund ve Edgerton, 2007).

2.7 CCE Panel Eşbütünleşme Tahmincisi

Ortak ilişkili Etkiler (CCE) tahmincisi, panel veri analizinde $N > T$ ve $N < T$ durumlarında kullanılabilen esnek bir yöntemdir. Yatay kesitler arasındaki bağımlılığı dikkate alarak, her bir

yatay kesit birimi için eğim katsayılarının farklılaşmasına izin verir (Pesaran, 2006; Pesaran ve Yamagata, 2008). Küreselleşme, ülkeler arasındaki ekonomik bağları güçlendirerek bir ülkede yaşanan şokların diğer ülkeleri etkileme olasılığını artırmıştır. Bu bağlamda, CCE modeli, yatay kesit birimleri arasındaki bağımlılığı hesaba katarak her birime özgü regresyon katsayılarını ayrı ayrı tahmin etmektedir (Erataş, 2012). Ayrıca, modele dahil edilmeyen faktörlerin etkilerini, her yatay kesit birimine ait zaman vektörleriyle çoğaltılmış regresyon denklemleri yoluyla dikkate almaktadır (Pesaran, 2006).

$$y_{it} = a_i d_t + \beta_{x_{it}} + e_{it} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad T = 1, 2, \dots, T$$

d_t , $n \times 1$ boyutunda bir vektördür ve gözlemlenebilir ortak etkileri temsil eder. Bu vektör, sabit etkiler veya mevsimsel kukla değişkenler gibi bileşenleri içerir ve $d_t = d'_{1t}, d'_{2t}, \dots, d'_{nt}$ şeklinde ifade edilir. Buna karşılık, x_{it} , $k \times 1$ boyutlu bir vektör olup, her bir bireysel birime özgü gözlemlenen regresörleri kapsar. Bu vektör, modelde bireysel spesifik faktörlerin analizine olanak tanır (Koçbulut ve Barış, 2016)

$$e_{it} = \gamma_i f_t + \varepsilon_{it}$$

Panel veri analizlerinde uzun dönemli eşbütünleşme katsayılarının doğru bir biçimde tahmin edilebilmesi amacıyla, Pesaran (2006) ile Pesaran ve Tosetti (2011), gözlemlenemeyen ortak şokları dikkate alan iki farklı tahmin edici önermiştir. Söz konusu modelde f_t , $m \times 1$ boyutlarında olup gözlemlenemeyen ortak etkileri temsil ederken, ε_{it} her birime özgü hata terimini ifade etmektedir. Geliştirilen bu yaklaşımlar; heterojen yapıları dikkate alan **Common Correlated Effects Mean Group (CCEMG)** ile homojenlik varsayımı altında ortalama etkilerin tahmin edilmesine imkân veren **Common Correlated Effects Pooled (CCEP)** tahmincileridir (Pesaran, 2006; Pesaran ve Tosetti, 2011). CCEMG ve CCEP yöntemleri, açıklayıcı değişkenlerin uzun dönem regresyon katsayılarını, yatay kesit bağımlılığı çerçevesinde sırasıyla belirli formüllerle hesaplanmaktadır (Pesaran, 2008);

$$\hat{\mathbf{b}}_{\text{CCEMG}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{b}_i$$

$$\mathbf{b}_{\text{CCEP}}' = (\sum_{i=1}^N 0_1 x_i' M_w' x_i)^{-1} \sum_{i=1}^N 0_1 x_i' M_w' x_i$$

2.8 AMG Panel Eşbütünleşme Katsayı Tahmincisi

Yatay kesit bağımlılığı ile eşbütünleşme ilişkisinin söz konusu olduğu durumlarda, uzun dönemli eşbütünleşme katsayılarının tahmini amacıyla kullanılan yöntemlerden biri panel AMG (Artırılmış Ortalama Grup) yöntemidir. Eberhardt ve Bond (2009) tarafından geliştirilen bu yöntem, serilerin farklı düzeylerde durağan halinde de kullanılabilir (Bucak, 2022). Panel AMG yöntemi, yatay kesit bağımlılığını ve panel veri setlerindeki heterojenliği dikkate alarak ortalama eğim katsayılarının güvenilir bir şekilde tahmin edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, serilerdeki ortak faktörleri hesaba katabilmesi ve açıklayıcı değişkenler ile hata terimleri arasında korelasyon bulunması durumunda ortaya çıkan içsellik sorunlarına karşı da etkili çözümler sunabilmesi açısından avantajlı bir yöntemdir (Eberhardt ve Bond, 2009). Bu yöntemle ilişkin modeller aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$Y_{it} = \beta_j^i X_{it} + u_{it}. u_{it} = a_i + \lambda_t^i f_t + \varepsilon_{it} (i = 1 \dots N, t = 1 \dots N, m = 1 \dots k)$$

$$x_{mit} = \pi_{mi} + \delta_{mi}^2 g_{mt} + p_{1mi} f_{1mt} + \dots + p_{nmi} f_{nmt} + v_{it}$$

$$f_t = t^2 f_{t-1} + \varepsilon_{it} \text{ ve } g_t = \psi^2 g_{t-1} + \Omega_{it}$$

Bu modellerde X_{it} ortak açıklayıcı değişken vektörünü, f_t ve g_t ise gözlemlenemeyen ortak faktörleri temsil etmektedir. λ_i katsayısı ise her bir kesitin bu ortak faktörlere olan yükünü ifade etmektedir.

3. Ampirik Bulgular

Çalışmada kullanılan panel verilerde yatay kesit bağımlılığını tespit etmek amacıyla LM (Breusch & Pagan, 1980) ve düzeltilmiş LM (Pesaran, Ullah & Yamagata, 2008) testleri uygulanmış olup, elde edilen sonuçlar Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 2: Yatay Kesit Bağımlılık Araştırması

	LM	p-değeri	LM _{adj}	p-değeri
--	----	----------	-------------------	----------

Yeşil Ar-Ge Yatırımları	36.009	0.022**	8.817	0.000***
Yeşil Teknoloji	168.602	0.000***	14.832	0.000***
Çevre Kirliliği	60.330	0.000***	3.323	0.000***

Not: ** ve *** işaretleri sırasıyla %95 ve %99 anlamlılık düzeyini ifade etmektedir.

Tablo 1 incelendiğinde, Yeşil Ar-Ge Yatırımları, Yeşil Teknoloji ve Çevre Kirliliği değişkenlerinde yatay kesit bağımlılığı bulunduğu görülmektedir. Yeşil Ar-Ge Yatırımları değişkeninde LM testi %5 anlamlılık seviyesinde ($p=0.022$) bağımlılık saptanırken, LM_{adj} testinde ise %1 anlamlılık seviyesinde daha güçlü bir bağımlılık görülmüştür. Yeşil Teknoloji ve Çevre Kirliliği değişkenlerinde ise her iki test de %1 anlamlılık seviyesinde anlamlı çıkması, birimlerin birbirinden bağımsız olmadığını ve modelleme sürecinde bu bağımlılığın göz önünde bulundurulması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda ikinci nesil panel birim kök, panel eşbütünlük ve panel nedensellik testlerinin kullanılması uygundur.

Tablo 3: Delta Homojenlik Testi

	Δ	p-değeri	Δ_{adj}	p-değeri
Model	10.125	0.000	10.619	0.000

Not: Anlamlılık düzeyi %1'den küçüktür ($p<0.01$).

Tablo 2'de yer alan Delta Homojenlik Testi sonuçları incelendiğinde, hem delta istatistiği hem de düzeltilmiş delta istatistiği için elde edilen p-değerlerinin 0.000 olduğu ve bu değer %1 anlamlılık düzeyinin altında yer aldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, H_0 hipotezinin reddedildiğine işaret etmektedir. Sonuç olarak, analiz edilen paneldeki parametrelerin homojen olmadığı, yani birimler arasında yapısal farklılıkların mevcut olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu bağlamda, yapılan çalışmalarda birim kök, eşbütünlük ve nedensellik analizlerinin heterojen yapıyı dikkate alan panel veri testleriyle gerçekleştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Tablo 4: CADF Birim Kök Test Sonuçları

Değişkenler	CIPS	CIPS in 1st
-------------	------	-------------

Yeşil Ar-Ge Yatırımları	-2,542	-4,315**
Yeşil Teknoloji	-5,126***	-
Çevre Kirliliği	-2,66	-4,300**

Not: Kritik değerler sırasıyla %1, %5, %10 anlamlılık düzeylerinde -4.67, -3.87, -3.49 olarak belirlenmiştir. Bu değerler sabit ve trendli model için geçerlidir ve Pesaran'ın (2007) "A Simple Panel Unit Root Test In The Presence Of Cross-Section Dependence, Journal of Applied Econometrics, 22 265-312" adlı makalesinden alınmıştır. ** ve *** işaretleri sırasıyla %95 ve %99 anlamlılık düzeyini ifade etmektedir.

Çalışmanın bu aşamasında, Pesaran (2007) tarafından geliştirilen CADF panel birim kök testi kullanılarak, panel verisi genelinde CIPS ortalaması hesaplanmıştır. Tablo 3'te yer alan bulgulara göre, yeşil teknoloji değişkeni seviye değerlerinde %99 güven düzeyiyle durağan kabul edilmiştir. Ancak, yeşil Ar-Ge yatırımları ve çevre kirliliği değişkenlerinin seviye değerlerinde birim kök içerdiği ve durağanlık bulunmadığı için bu değişkenlerin birinci farkları alınmıştır. Birinci farklar alındıktan sonra, yeşil Ar-Ge yatırımları ve çevre kirliliği değişkenlerinin %95 güven aralığında durağanlaştığı tespit edilmiştir.

Birinci farkı alınarak durağanlaştırılan değişkenler arasındaki olası uzun dönemli ilişkilerin analiz edilebilmesi amacıyla panel eşbütünleşme testlerine başvurulmuştur. Bu çerçevede, ilk olarak farklı seviyelerde durağanlık tespit edilen paneller arasındaki ilişkiyi incelemeye uygun olan Durbin-Hausman panel eşbütünleşme testi uygulanmış ve değişkenler arasında uzun dönemli eşbütünleşme ilişkisinin varlığı araştırılmıştır.

Tablo 5: Durbin-Hausman Panel Eşbütünleşme Test Sonuçları

DH_grup	İstatistik	Anlamlılık Değ.
Yeşil Teknoloji ve Yeşil Ar-Ge Yatırımları	-1.798**	0.036
Yeşil Teknoloji ve Çevre Kirliliği	-0.899	0.184

Not: ** %95 güvenirlilikle anlamlılığı ifade etmektedir.

Durbin-Hausman panel eşbütünleşme testi sonuçları, yeşil teknoloji ile hem yeşil Ar-Ge yatırımları hem de çevre kirliliği arasındaki uzun dönemli ilişkilerin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Yeşil teknoloji ile yeşil Ar-Ge yatırımları arasındaki ilişkiye dair elde edilen test istatistiği -1.798 olup, bu değere karşılık gelen %5 düzeyindeki anlamlılık katsayısı 0.036'dır.

İlgili bulgu, iki değişken arasında istatistiksel olarak anlamlı ve uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisinin varlığına işaret etmektedir. Bu doğrultuda, yeşil teknoloji ile yeşil Ar-Ge yatırımları arasında uzun vadeli bir denge ilişkisinin mevcut olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Buna karşın, yeşil teknoloji ile çevre kirliliği arasındaki ilişkiye yönelik olarak elde edilen test istatistiği -0.899 ve anlamlılık düzeyi 0.184'tür. İlgili istatistiksel değerler, söz konusu iki değişken arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisinin varlığına dair anlamlı bir kanıt sunmamaktadır. Dolayısıyla, analiz kapsamında yalnızca yeşil teknoloji ile yeşil Ar-Ge yatırımları arasında uzun dönemli bir ilişkinin bulunduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6: Westerlund ve Edgerton Panel Eşbütünleşme Test Sonuçları

Çevre Kirliliği ve Yeşil Ar-Ge Yatırımları	
Lm İstatistik	9.131
Bootstrap anlamlılık değ.	0.000

Panellerin aynı seviyede durağan olması halinde kullanılabilen Westerlund ve Edgerton (2008) tarafından geliştirilen panel eşbütünleşme testi kapsamında elde edilen bulgular, yeşil Ar-Ge yatırımları ile çevre kirliliği arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Analiz sonucunda hesaplanan LM istatistiği 9.131 olup, bootstrap yöntemiyle elde edilen anlamlılık düzeyi 0.000'dir. Bu durum, %1 düzeyinde istatistiksel anlamlılığa işaret etmekte ve söz konusu iki değişken arasında uzun vadeli, istikrarlı bir denge ilişkisinin varlığını doğrulamaktadır. Elde edilen sonuçlar, çevresel bozulmayı azaltmaya yönelik yeşil Ar-Ge yatırımlarının, çevre kirliliği üzerinde uzun dönemde belirleyici bir rol oynayabileceğini göstermesi bakımından önem taşımaktadır.

Tablo 7: Pesaran (2006) CCE Grup Ortalama Tahmin Sonuçları

Bağımlı Değişken: Çevre Kirliliği	Katsayı	Standart Sapma	T istatistiği
Bağımsız Değişken: Yeşil Ar-Ge Yatırımları	0.313	0.237	1.319

Tablo 8: Pesaran (2006) CCE Tahmin Sonuçları

Bağımlı Değişken: Çevre Kirliliği Bağımsız Değişken: Yeşil Ar-Ge Yatırımları	Katsayı	Standart Hata
Kanada	0.457	0.091
Fransa	0.015	0.050
Almanya	-0.408	0.267
İtalya	0.130	0.084
Japonya	0.166	0.083
Birleşik Krallık	0.226	0.079
ABD	1.607	0.470

Çalışmanın bu aşamasında çevre kirliliği ve yeşil Ar-Ge değişkenlerinin aynı seviyede durağan olmaları ve aralarında eşbütünlüşme ilişkisi tespit edilmiş olması sebebiyle Pesaran (2006) CCE grup ortalaması testi kullanılmıştır. CCE panel eşbütünlüşme tahmin sonuçlarına göre, panel bazında yeşil Ar-Ge yatırımlarının çevre kirliliği üzerindeki etkisi pozitif yönde olmakla birlikte, bu durum, G7 ülkeleri genelinde yeşil Ar-Ge yatırımlarının çevre kirliliğini azaltmada ortak ve güçlü bir etki oluşturmadığını göstermektedir. Yeşil teknoloji değişkeni ile çevre kirliliği arasında eşbütünlüşme ilişkisi tespit edilemediğinden ve bu ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görüldüğünden, söz konusu değişken modele dâhil edilmemiş ve ülke bazlı tahminler gerçekleştirilmemiştir.

Ülke bazlı CCE tahmin sonuçları ise bu genel görünümün ardında önemli farklılıklar olduğunu ortaya koymaktadır. ABD, Kanada, Birleşik Krallık ve Japonya’da yeşil Ar-Ge yatırımları çevre kirliliğini artırıcı ve istatistiksel olarak anlamlı etkiler üretmektedir. Yeşil Ar-Ge yatırımları bir birim arttığında çevre kirliliği ABD’de 1.607, Kanada’da 0.457, Birleşik Krallık’ta 0.226 ve Japonya’da 0.166 birim artmaktadır. Almanya’da bu etkinin yönü negatif -0.408 şeklindedir. Bu bulgular, yeşil Ar-Ge yatırımlarının çevre üzerindeki etkilerinin ülkeler arasında belirgin farklılıklar gösterdiğini ve bu yatırımların etkinliğinin, ülkelerin teknolojik altyapısı, çevresel düzenlemeleri ve politika uygulama biçimlerine bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir.

Yeşil Paradoks ve Jevons Paradoksu, çevresel stratejilerin karmaşıklığını ve potansiyel tuzaklarını açıkça ortaya koyar. Yeşil Paradoks, çevre politikalarının küresel koordinasyon eksikliği nedeniyle kirliliği artırabileceğini gösterirken, Jevons Paradoksu, kaynak kullanımında verimlilik artışlarının uzun vadede tüketimi azaltmak yerine artırabileceğini savunur. Yeşil Ar-Ge yatırımlarının çevresel etkileri, ülkelerin yapısal özelliklerine ve düzenleyici çerçevelerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Örneğin, Almanya gibi sıkı

çevresel düzenlemelere sahip ülkelerde kirlilik azaltıcı etkiler gözlenirken, gevşek düzenlemelere sahip ülkelerde ters etkiler ortaya çıkabilir. Bu, çevresel politikaların yerel bağlama özgü tasarlanması gerektiğini vurgular.

Yeşil yatırımların çevresel iyileşme üzerindeki etkisi, uygulandıkları bölgenin yönetim kalitesi, yolsuzluk düzeyi ve kurumsal altyapısına göre değişiklik gösterebilmektedir. Yerel yönetim kalitesinin düşük olduğu ve yolsuzluğun yaygın olduğu bölgelerde, yeşil yatırımlar beklenen çevresel faydaları sağlayamayabilir ve hatta kirliliği artırabilir. Benzer şekilde, yeşil ekonomi uygulamalarının gelişme aşamasında olduğu bölgelerde, yatırımlar verimsiz projelere yönelerek çevresel kazanımları sınırlayabilir. Fikri mülkiyet haklarının zayıf olduğu veya yerel yönetimler arasında koordinasyon eksikliği bulunan durumlarda, kaynakların yanlış tahsisi nedeniyle yatırımların etkinliği azalır. Bu yapısal sınırlılıklar, yeşil yatırımların potansiyel olumlu etkilerini gölgeleyerek çevre kirliliğini azaltmak yerine artırıcı sonuçlar doğurabilir.

Tablo 9: AMG Panel Eşbütünleşme Tahminci Sonuçları (Panel bazında)

Bağımlı Değişken: Yeşil Teknoloji Bağımsız Değişken: Yeşil Ar-Ge Yatırımları	Katsayı	Std Hata	Anlamlılık - Değeri
	156.4335	147.3693	0.288

Tablo 10: AMG Panel Eşbütünleşme Tahminci Sonuçları (Ülke bazında)

Bağımlı Değişken: Yeşil Teknoloji Bağımsız Değişken: Yeşil Ar-Ge Yatırımları	Katsayı	Anlamlılık - Değeri
Kanada	-80740	0.855
Fransa	-3.2169	0.484
Almanya	64.8467	0.353
İtalya	5.5911	0.166
Japonya	-2.1392	0.955
Birleşik Krallık	-8.1487	0.516
ABD	1038.809	0.042**

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

Aynı seviyede durağanlığın olmadığı ancak yatay kesit bağımlılığı ve heterojen bir yapının tespit edildiği paneller arasında AMG panel eşbütünleşme tahmincisini kullanmak uygundur. AMG yöntemiyle elde edilen eşbütünleşme tahmin sonuçlarına göre, panel düzeyinde yeşil Ar-Ge yatırımları ile yeşil teknoloji arasında pozitif yönde bir ilişki gözlemlenmiş olsa da, bu ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görülmektedir. Ülke bazında yapılan analizlerde ise yalnızca ABD'de yeşil Ar-Ge yatırımlarının yeşil teknoloji gelişimini anlamlı ve pozitif yönde etkilediği tespit edilmiştir. Diğer ülkelerdeki katsayılar anlamlılık düzeyine ulaşmamakta ve ilişki yönü ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Bu durum, yeşil Ar-Ge yatırımlarının yeşil teknoloji üzerindeki etkisinin ülkelere özgü dinamikler çerçevesinde şekillendiğini ve politika yapıcılarının bu farklılıkları göz önünde bulundurarak ülke özelinde stratejiler geliştirmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular ABD dışındaki ülkelerde yapılan yeşil Ar-Ge yatırımlarının yeşil teknolojide henüz karşılığını bulamadığını göstermektedir.

Sonuç ve Öneriler

Çevresel sürdürülebilirlik ve karbon emisyonlarının azaltılması, küresel iklim değişikliğiyle mücadelede temel bir öncelik olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, G7 ülkelerindeki yeşil Ar-Ge yatırımları ile yeşil teknoloji inovasyonunun çevre kirliliği üzerindeki etkilerini inceleyen bu çalışma, çevresel ve ekonomik politikaların tasarımına yönelik önemli bir akademik katkı sunmaktadır. Çalışmada, 1990-2022 dönemine ait yıllık veriler kullanılarak ikinci nesil panel veri yöntemleri uygulanmıştır. Yatay kesit bağımlılığı için Breusch-Pagan LM ve $CDLM_{adj}$ testleri, homojenlik için Delta testi, serilerin durağanlığı için CADF panel birim kök testi, uzun dönemli ilişkiler için Durbin-Hausman (2008) ve Westerlund-Edgerton (2007) eşbütünleşme testleri, uzun dönem katsayı tahminleri için ise Ortak İlişkili Etkiler (CCE) ve Artırılmış Ortalama Grup (AMG) yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler, panel veri setindeki yatay kesit bağımlılığı, heterojenlik ve eşbütünleşme dinamiklerini dikkate alarak güvenilir sonuçlar üretmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, yeşil Ar-Ge yatırımlarının çevresel etkilerinin yalnızca yatırım hacmiyle değil, ülkelerin yapısal özellikleri, düzenleyici çerçeveleri ve yönetim kalitesiyle şekillendiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, Almanya hariç G7 ülkelerinde yeşil Ar-Ge yatırımlarının çevre kirliliğini artırıcı etkiler yaratabileceğini göstererek, Yeşil Paradoks ve Jevons Paradoksu gibi teorilerin pratikteki yansımalarına işaret

etmektedir. Bu durum, çevresel yatırımların etkinliğini artırmak için ülkeye özgü stratejilerin geliştirilmesi gerektiğini vurgularken, politika yapıcılara, çevresel iyileşme hedeflerine ulaşmak için kurumsal altyapının güçlendirilmesi, düzenleyici çerçevelerin optimize edilmesi ve yatırımların niteliğine odaklanılması gerektiğini göstermektedir. Almanya'daki negatif katsayı, sıkı çevresel düzenlemelerin ve etkili yönetim yapılarının kirliliği azaltmada kritik bir rol oynadığını ortaya koyarken, diğer ülkelerdeki pozitif katsayılar, yatırımların verimsiz projelere yönelmesi, koordinasyon eksiklikleri veya zayıf kurumsal yapılar gibi faktörlerin çevresel sonuçları olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

Literatürde, yeşil teknoloji ve Ar-Ge yatırımlarının CO2 emisyonları üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar, heterojen sonuçlar sunmaktadır. Cheng vd. (2021), Hussain vd. (2021) ve Sun vd. (2019), yeşil inovasyonun ve yenilenebilir enerji kullanımının emisyonları azalttığını savunurken, Khan vd. (2020) ve Işık ve Kılıç (2014), G7 ve OECD ülkelerinde çevresel inovasyonun kirliliği azaltıcı etkisini doğrulamaktadır; bu, mevcut çalışmanın Almanya'ya ilişkin bulgularıyla uyumludur. Özellikle Hashmi ve Alam (2019), OECD ülkelerinde çevre dostu patentlerin emisyonları azalttığını göstererek Almanya bulgularını desteklemektedir. Buna karşılık, Khattak vd. (2020), BRICS ülkelerinde inovasyonun emisyonları azaltmada etkisiz olduğunu; Carrión-Flores ve Innes (2010) ise ABD'de inovasyonun sınırlı bir etkiye sahip olduğunu öne sürerek, bu çalışmanın ABD, Kanada, Japonya ve Birleşik Krallık'taki kirliliği artırıcı bulgularıyla paralellik göstermektedir. Majekodunmi vd. (2023) ve Du vd. (2019), etkilerin ekonomik büyüme ve gelir seviyesine bağlı olarak farklılaştığını belirtmiş; bu, çalışmanın ülkeler arası heterojenlik bulgularını desteklemektedir. Shan vd. (2021), Türkiye'de yeşil inovasyonun emisyonları azalttığını bulurken, bu çalışmada yeşil teknoloji ile çevre kirliliği arasında anlamlı bir uzun dönem ilişkisi bulunmaması, veri seti, zaman aralığı ve modelleme farklılıklarından kaynaklanabilir. Genel olarak, literatür, yeşil inovasyonun etkisinin ülkeye özgü faktörlere, düzenleyici çerçevelere ve kurumsal yapılara bağlı olduğunu gösterirken, bu çalışma, Almanya dışındaki ters etkilerle literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

Çalışmanın belirli sınırlılıkları olmakla birlikte, gelecekteki araştırmalar için önemli fırsatlar da barındırmaktadır. Öncelikle, analiz yalnızca üç temel değişken yeşil Ar-Ge harcamaları, yeşil teknoloji inovasyonu ve çevre kirliliği üzerine odaklanmıştır. Bu tercih, modelin yalın ve odaklı kalmasını sağlamakla birlikte, çevresel bozulma üzerinde etkili olabilecek diğer yapısal ve ekonomik faktörlerin etkisinin dışarıda kalmasına neden olmuştur. Benzer şekilde, yalnızca G7

ülkelerini kapsayan veri seti sayesinde ileri teknolojiye sahip ekonomilere ilişkin derinlemesine bulgular elde edilmiş; ancak sonuçların farklı ülke gruplarına genellenebilirliği sınırlı kalmıştır. Bu doğrultuda, ilerleyen çalışmalarda analiz kapsamının genişletilerek enerji tüketim yapısı, çevre koruma harcamaları gibi değişkenlerin modele dâhil edilmesi faydalı olacaktır. Böylece, yeşil Ar-Ge yatırımlarının çevresel etkileri daha çok boyutlu biçimde değerlendirilebilir. Ayrıca, panel nedensellik analizleri aracılığıyla değişkenler arasındaki yönlü ilişkilerin ortaya konması, politika yapıcılar açısından daha güçlü çıkarımlar sunabilir. Son olarak, kurumsal kapasite, yeşil finansman olanakları ve çevresel regülasyon yoğunluğu gibi ülkelere özgü farklılıkların modellenmesi, yeşil inovasyon politikalarının etkililiğini anlama noktasında önemli katkılar sağlayacaktır. Bu tür genişletmeler, çalışmanın özgün katkısını daha da güçlendirecek ve sürdürülebilir kalkınma bağlamında politika önerilerini zenginleştirecektir.

Kaynakça

- Adedoyin, F. F., Ozturk, I., Bekun, F. V., Agboola, P. O. & Agboola, M. O. (2021). Renewable and nonrenewable energy policy simulations for abating emissions in a complex economy: Evidence from the novel dynamic ARDL. *Renewable Energy*, 177, 1408-1420. Ahmad, M., Jabeen, G. & Wu, Y. (2021). Heterogeneity of pollute.
- Akca, H. (2021). Environmental Kuznets Curve and financial development in Turkey: evidence from augmented ARDL approach. *Environmental Science and Pollution Reserach*, 28, 69149–69159.
- Alamsyah, D. P., & Muhammed, H. A. A. (2019). Antecedents of green awareness for Eco-Friendly Products. *ASEAN Marketing Journal*, 10(2), 3.
- Altınar, A., & Toktaş, Y. (2017). The Effects of innovation on economic growth in the emerging market economics: panel data analysis. *Journal of Current Researches on Business and Economics*, 7(2), 477-496.
- Bai, J., Kao, C., & Ng, S. (2009). Panel cointegration with global stochastic trends. *Journal of Econometrics*, 149(1), 82-99.
- Barak, D., & Koçoğlu, M. (2023). Çevresel Ar-Ge Harcamalarını Hızlandırmak Karbon Emisyonlarını Azaltır mı?: Çevresel Kuznets Eğrisi Hipotezi Perspektifinde Panel Kantil Regresyon Kanıtları. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal Ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 25(45), 768-792.

Breusch, T.S ve A.R. Pagan(1980), The Lagrange Multiplier Test and Its Applications to Model Specification Tests in Econometrics, *Review of Economic Studies*, 47, 239-53.

Braun, E., & Wiold, D. (1994). Regulation as a means for the social control of technology. *Technology Analysis & Strategic Management*, 6(3), 259-272.

Bucak, Ç. (2022). BRICS-T ülkelerinde ekonomik karmaşıklık ve küreselleşme ilişkisi: panel veri analizi. *Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi (AKAD)*, 14(26), 92-105.

Carrión-Flores, C. E. & Innes, R. (2010). Environmental innovation and environmental performance. *Journal of Environmental Economics and Management*, 59(1), 27-42. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2009.05.003>

Chen, H., Yi, J., Chen, A., Peng, D., & Yang, J. (2023). Green technology innovation and CO2 emission in China: Evidence from a spatial-temporal analysis and a nonlinear spatial durbin model. *Energy Policy*, 172, 113338.

Cheng, C., Ren, X., Dong, K., Dong, X., & Wang, Z. (2021). How does technological innovation mitigate CO2 emissions in OECD countries? Heterogeneous analysis using panel quantile regression. *Journal of environmental management*, 280, 111818.

Çınar, S. (2010). OECD ülkelerinde kişi başı GSYİH durağan mı? panel veri analizi. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 29(2), 591-601.

Demez, S. (2021). Effects of Environmental Innovations, Renewable Energy Consumption and Economic Growth on CO2 Emission: Panel Data Analysis for Select G-20 Countries. *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 9(4), 1007-1017.

Du, K. & Li, J. (2019). Towards a green world: How do green technology innovations affect total-factor carbon productivity. *Energy Policy*, 131, 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.033>

Eberhardt, M. and Bond, S. , Cross-section Dependence in Nonstationary Panel Models: A Novel Estimator, MPRA Paper, No. 17870.

Erataş, F. (2012), *Döviz Kuru ve Ekonomik Büyüme Ekseninde Krugman 45 Derece Kuralının Geçerliliği: Küresel Bir Analiz*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Farooq, F., Chaudhry, I. S., Yusop, Z. & Habibullah, M. S. (2020). How do globalization and foreign direct investment affect environmental quality in OIC member countries?, *Pakistan Journal of Commerce and Social Sciences (PJCSS)*, 14(2), 551-568.

Fethi, S., & Rahuma, A. (2019). The role of eco-innovation on CO 2 emission reduction in an extended version of the environmental Kuznets curve: evidence from the top 20 refined oil exporting countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 30145-30153.

Göçer, İ. (2013). Ar-Ge harcamalarının yüksek teknolojlili ürün ihracatı, dış ticaret dengesi ve ekonomik büyüme üzerindeki etkileri. *Maliye Dergisi*, 165(2), 215-240.

Grossman, G. M. ve Krueger, A. B. (1991). Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. <https://www.nber.org/papers/w3914>.

Guo, M., Nowakowska-Grunt, J., Gorbanyov, V., & Egorova, M. (2020). Green technology and sustainable development: Assessment and green growth frameworks. *Sustainability*, 12(16), 6571.

Guo, Y., Xia, X., Zhang, S. & Zhang, D. (2018). Environmental regulation, government R&D funding and green technology innovation: Evidence from China provincial data. *Sustainability*, 10(4), 940. <https://doi.org/10.3390/su10040940>

Hashmi, R. & Alam, K. (2019). Dynamic relationship among environmental regulation, innovation, CO2 emissions, population, and economic growth in OECD countries: A panel investigation. *Journal of cleaner production*, 231, 1100-1109. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.325>

Hsiao, C. (2006). Panel Data Analysis —Advantages and Challenges. Institute of Economic Policy Research, 1–63

Hussain, Z., Mehmood, B., Khan, M.K. & Tsimisaraka, R.S.M. (2021). Green Growth, Green Technology, and Environmental Health: Evidence from High-GDP Countries. *Frontiers in Public Health*, 9.

Işık, N., & Kılıç, E. (2014). Ulaştırma sektöründe CO2 emisyonu ve enerji ar-ge harcamaları ilişkisi. *Sosyoekonomi*, 22(22).

Karanfil, M., Uzma, O., Bektaş Dalgacı, B., Erden, D. (2025). Dijitalleşme ve İnovasyonun Karbon Ayak İzine Etkisi: Seçilmiş Oecd Ülkeleri İçin Panel Veri Analizi. *Biga İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 5(3), 203-215. <https://doi.org/10.70754/biibfd.1526606>

Khan, Z., Ali, S., Umar, M., Kirikkaleli, D., & Jiao, Z. (2020). Consumption-based carbon emissions and international trade in G7 countries: the role of environmental innovation and renewable energy. *Science of the Total Environment*, 730, 138945.

Khattak, I., Ahmad, M., Khan, Z. U., & Khan, A. (2020). Exploring the impact of innovation, renewable energy consumption, and income on CO2 emissions: new evidence from the BRICS economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(12), 13866-13881. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07876-4>

Kılınc, N. Ş., & Kılınc, E. C. (2024) Yeşil İnovasyonun Enerji Verimliliğine Etkisi Üzerine Bir Panel Veri Analizi. *Uluslararası Ekonomi ve Yenilik Dergisi*, 10(1), 1-22.

Koçbulut, Ö., & Barış, S. (2016). Avrupa Birliği ülkelerinde ihracat ve doğrudan yabancı yatırımların kadın istihdamı üzerindeki etkisi: Panel veri analizi. *Aydın İktisat Fakültesi Dergisi*, 1(2), 22-39.

Konuk, F., Zeren, F., Akpınar, S., & Yıldız, Ş. (2021). Biomass energy consumption and economic growth: Further evidence from NEXT-11 countries. *Energy Reports*, 7, 4825-4832.

Koop, G. (1998). Carbon dioxide emissions and economic growth: a structural approach. *Journal of Applied Statistics*, 25(4), 489-515.

Lin, H., & Long, C. X. (2021). Do discretion criteria for patent administrative law enforcement encourage innovation among firms?. *China Economic Quarterly International*, 1(2), 160-175.

Majekodunmi, T. B., Shaari, M. S., Abidin, N. Z., & Ridzuan, A. R. (2023). Green technology, exports, and CO2 emissions in Malaysia. *Heliyon*, 9(8).

Mangır, N., & Şahin, Ü. A. (2022). An environmentally extended global multi-regional input-output analysis of consumption-based and embodied import-based carbon emissions of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(36), 54813-54826.

Nikzad, R., & Sedigh, G. (2017). Greenhouse gas emissions and green technologies in Canada. *Environmental Development*, 24, 99-108.

Obobisa, E. S., Chen, H., & Mensah, I. A. (2022). The impact of green technological innovation and institutional quality on CO2 emissions in African countries. *Technological Forecasting and Social Change*, 180, 121670. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121670>

Organisation for Economic Co-operation and Development. (n.d.). *Environmentally related patents*. OECD Data Explorer. [https://dataexplorer.oecd.org/vis?df\[ds\]=DisseminateFinalDMZ&df\[id\]=DSD_PAT_DEV%40DF_PAT_DEV&df\[ag\]=OECD.ENV.EPI&dq=.A.ENV_PAT...&pd=1990%2C&to\[TIME_PERIOD\]=false&vw=tb](https://dataexplorer.oecd.org/vis?df[ds]=DisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_PAT_DEV%40DF_PAT_DEV&df[ag]=OECD.ENV.EPI&dq=.A.ENV_PAT...&pd=1990%2C&to[TIME_PERIOD]=false&vw=tb)

Our World in Data. (n.d.). *CO₂ emissions per capita*. <https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-per-capita?tab=table&country=~CAN>

Özcan, B., & Arı, A. (2014). Araştırma-geliştirme harcamaları ve ekonomik büyüme ilişkisi: panel veri analizi. *Maliye Dergisi*, 166(1), 39-55.

Pachauri, R.K.; Allen, M.R.; Barros, V.R.; Broome, J.; Cramer, W.; Christ, R.; Church, J.A.; Clarke, L.; Dahe, Q.; Dasgupta, P.; et al. *Climate Change (2014): Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC: Geneva, Switzerland, 151.

Pesaran, H. M. (2006), *A Simple Panel Unit Root Test in the Presence of Cross Section Dependency*, Cambridge Working Papers in Economics 0346.

Pesaran H. M. (2007) A Simple Panel Unit Root Test In The Presence Of Cross-Section Dependence, *Journal of Applied Econometrics*, 22 265-312

Pesaran, H.M., ve Yamagata, T. (2008), Testing Slope Homogeneity in Large Panels, *Journal of Econometrics*, 142, 50–93.

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.

Pesaran, M. H., & Tosetti, E. (2011). Large panels with common factors and spatial correlation. *Journal of Econometrics*, 161(2), 182-202.

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.

Ramzan, M., Raza, S. A., Usman, M., Sharma, G. D., and Iqbal, H. A. (2022). Environmental Cost of Non-renewable Energy and Economic Progress: Do ICT and Financial Development Mitigate Some burden? *J. Clean. Prod.* 333, 130066. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130066>

Sağlam, Y., Egeli, H. A., & Egeli, P. (2017). The Relationship between R&D Expenditures and Economic Growth for Some Developed and Developing Countries: A Panel Data Analysis. *Sosyoekonomi*, 25(31), 149-166.

Shan, S., Genç, Y., Kamran, H. W., & Dinca, G. (2021). Role of green technology innovation and renewable energy in carbon neutrality: A sustainable investigation from Turkey. *Journal of Environmental Management*, 294, 113004. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113004>

Sharif, A., Saqib, N., Dong, K., & Khan, S. A. R. (2022). Nexus between green technology innovation, green financing, and CO2 emissions in the G7 countries: the moderating role of social globalisation. *Sustainable Development*, 30(6), 1934-1946.

Sun, H., Edziah, B. K., Sun, C., & Kporsu, A. K. (2019). Institutional quality, green innovation and energy efficiency. *Energy Policy*, 135, 111002. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111002>

Telatar, O. M., & Birinci, N. (2022). The effects of environmental tax onecological footprint and carbon dioxide emissions: A nonlinearSHARIF ET AL . 1945 hypothesis: Evidence from methods moment of quantile regression.*Renewable Energy*, 192, 485–494. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.123>

Ünlü, F. (2022). Yükselen piyasa ekonomilerinde finansal gelişme ve gelir eşitsizliği ilişkisi: Yatay Kesit Bağımlılığı Altında Kurumların Moderatör Etkisi Üzerine Heterojen panel veri analizi. *BDDK Bankacılık ve Finansal Piyasalar Dergisi*, 16(1), 107-137.

Usman, M., and Makhdum, M. S. A. (2021). What Abates Ecological Footprint in BRICS-T Region? Exploring the Influence of Renewable Energy, Non-renewable Energy, Agriculture,

forest Area and Financial Development. *Renew. Energ.* 179, 12–28. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.014>

Wang, M. L., Wang, W., Du, Y., Li, C. F., & He, Z. (2020). Causal relationships between carbon dioxide emissions and economic factors: Evidence from China. *Sustainable Development*, 28(1), 73-82. <https://doi.org/10.1002/sd.1966>

Westerlund, J., & Edgerton, D. L. (2007). New improved tests for cointegration with structural breaks. *Journal of time series Analysis*, 28(2), 188-224.

Westerlund, J. (2008). Panel cointegration tests of the Fisher effect. *Journal of Applied Econometrics*, 23(2), 193-233.

Zhang, J., Terrones, M., Park, C. R., Mukherjee, R., Monthioux, M., Koratkar, N., ... & Bianco, A. (2016). Carbon science in 2016: Status, challenges and perspectives. *Carbon*, 98, 708-732.