



Nükleer ve Yenilenebilir Enerji, Doğrudan Yabancı Yatırım ve Ekonomik Büyümenin Ekolojik Ayak İzi Üzerindeki Etkisi: Nükleer Enerji Tüketen Ülkelerden Kanıtlar

Mehmet Ali Demir ¹

Öz: Nükleer enerji, dünya çapında birçok ülkede artan enerji taleplerini karşılamak için uygulanabilir bir alternatif enerji kaynağı olarak ortaya çıkan, çevre açısından sürdürülebilir bir enerji üretim biçimi olarak son yıllarda geniş çapta kabul gören bir enerji kaynağını temsil etmektedir. Mevcut literatürde geniş bir örneklemde nükleer enerjinin ekolojik ayak izi üzerindeki potansiyel etkilerini inceleyen çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu doğrultuda çalışmanın temel amacı, nükleer enerji tüketimi gerçekleştiren 25 ülkede 2000-2023 yılları arasında nükleer enerjinin çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinden biri olan ekolojik ayak izi üzerindeki potansiyel etkilerini analiz etmektir. Aynı zamanda çalışma, yenilenebilir enerjinin, ekonomik büyümenin ve doğrudan yabancı yatırımların ekolojik ayak izi üzerindeki etkilerine odaklanırken, çevresel Kuznets eğrisinin (EKC) geçerliliğini de sorgulamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, farklı çevresel sürdürülebilirlik derecelendirmelerine sahip ülkeler arasında çeşitli değişkenlerin ne ölçüde etki gösterdiğini incelemek için momentler yöntemi kantil regresyon (MMQR) kullanılmıştır. Bulgular; bütün kantillerde nükleer enerjinin ve ekonomik büyümenin ekolojik ayak izine katkı sağladığını, doğrudan yabancı yatırımların ekolojik ayak izini artırarak kirlilik cenneti yarattığını, buna rağmen yenilenebilir enerji tüketiminin ekolojik ayak izini azalttığını ve son olarak da EKC hipotezinin ters U şeklindeki yapısının doğrulandığını göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Nükleer Enerji, Kirlilik Cenneti Hipotezi, Çevresel Kuznets Eğrisi, Ekolojik Ayak İzi, Momentler Yöntemi Kantil Regresyon

JEL: Q40, Q43, Q50

Geliş : 13 Ocak 2026
Düzeltilme : 11 Mart 2026
Kabul : 27 Mart 2026

Tür : Araştırma

The Impact of Nuclear and Renewable Energy, Foreign Direct Investment and Economic Growth on Ecological Footprint: Evidence from Nuclear Energy-Consuming Countries

Abstract: Nuclear energy represents a widely accepted form of energy production in recent years, emerging as a viable alternative energy source to meet increasing energy demands in many countries worldwide, and considered environmentally sustainable. The current literature lacks studies examining the potential impacts of nuclear energy on the ecological footprint in a large sample size. Therefore, the main objective of this study is to analyze the potential impacts of nuclear energy on the ecological footprint, an indicator of environmental sustainability, in 25 countries consuming nuclear energy between 2000 and 2023. Simultaneously, the study focuses on the effects of renewable energy, economic growth, and foreign direct investment on the ecological footprint, while also questioning the validity of the environmental Kuznets curve (EKC). To this end, the method of moments quantile regression (MMQR) was used to examine the extent to which various variables have an impact among countries with different environmental sustainability ratings. The findings show that in all quantiles, nuclear energy and economic growth contribute to the ecological footprint, foreign direct investment increases the ecological footprint and creates a pollution haven, while renewable energy consumption reduces the ecological footprint, and finally, the inverted U-shaped structure of the EKC hypothesis is confirmed.

Keywords: Nuclear Energy, Pollution Haven Hypothesis, Environmental Kuznets Curve, Ecological Footprint, Method of Moments Quantile Regression

JEL: Q40, Q43, Q50

Received : 13 January 2026
Revised : 11 March 2026
Accepted : 27 March 2026

Type : Research

Cite this article as: Demir, M. A. (2026). Nükleer ve yenilenebilir enerji, doğrudan yabancı yatırım ve ekonomik büyümenin ekolojik ayak izi üzerindeki etkisi: Nükleer enerji tüketen ülkelerden kanıtlar. *Business and Economics Research Journal*, 17(2), 185-205. <http://dx.doi.org/10.20409/berj.2026.494>

Copyright: © 2026 by the author(s). This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY-NC) International License.

¹ Asst. Prof., PhD., Cankiri Karatekin University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Economics, Cankiri, Türkiye, malidemir@karatekin.edu.tr

1. Giriş

İklim değişikliği; ekosistemleri, insan sağlığını ve ekonomik istikrarı tehdit eden 21. yüzyılın en acil küresel sorunlarından biridir. Özellikle fosil yakıt yakımından kaynaklanan karbondioksit (CO₂) başta olmak üzere, sera gazı emisyonlarındaki artıştan kaynaklanan iklim değişikliği, aşırı hava olaylarını, deniz seviyesinin yükselmesini ve biyolojik çeşitlilik kaybını hızlandırmaktadır (IPCC,2022). Bu olumsuz durumlar da çevresel kalite ve ekonomik istikrar için zararlı hale gelmiştir (Rani vd., 2023). Ayrıca, bu süreçte ekolojik açık belirgin bir şekilde artmış ve bu da sürdürülebilir kalkınmanın önünde kritik bir engel oluşturmuştur (DiMaria, 2019).

Son birkaç on yıldır araştırmacılar, ekonomik faktörlerin çevreyi nasıl etkilediğini anlamak için önemli çabalar sarf etmişlerdir. Ekonomik ve çevresel faktörler arasındaki bağlantı çeşitli açılardan incelenmiş ve çevreyi etkileyen çok sayıda ekonomik faktör belirlenmiştir. Ekonomik faaliyetler, öncelikle sera gazı emisyonları yoluyla çevreyi etkilemektedir. Sonuç olarak, ekonomik literatür genellikle sera gazı emisyonlarını artıran faktörlere odaklanmaktadır. Çeşitli ekonomik faaliyetler ve sera gazları arasındaki bağlantıyı inceleyen çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Alandaki araştırmaların çoğu, çevresel zararlar için bir gösterge olarak CO₂ emisyonlarına odaklanmıştır. Ancak bu kavram çevresel bozulmayı detaylı olarak göstermemektedir; çünkü emisyonlar yalnızca hava kirliliğini hesaba katmakta ve su ve toprak kirliliği gibi diğer kirlilik türlerini kapsamamaktadır (Hakkak vd., 2023). Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda CO₂ emisyonları yerine ekolojik ayak izi değişkeni dikkate alınmakta ve çevresel bozulma bu değişken yardımıyla açıklanmaya çalışılmaktadır. Ekolojik ayak izi, insanların çevre üzerindeki etkisinin önemli bir göstergesidir ve aynı zamanda sürdürülebilirliği teşvik etmek için çevre politikalarının ne kadar sıkı olduğunu değerlendirmek için ölçütler sağlamaktadır (Khalid vd., 2021; Nathaniel vd., 2021). Ekolojik ayak izi sahip olduğumuz ve kullandığımız doğa miktarını hesaba katan bir çevresel gösterge olarak literatürde yer almaktadır. Yani doğaya olan talep ve arz, ekolojik ayak izinin hesaplamasıyla ölçülmektedir. Nüfusun talep tarafında rekabet ettiği toplam verimli alanları hesaplamaktadır. Tüketilen doğal kaynakları üretmek ve özellikle CO₂ emisyonlarını emmek için gereken ekolojik kaynakları ölçmektedir (Umair vd., 2023).

Çevresel bozulmanın temel belirleyicilerinden biri ekonomik büyüme düzeyidir (Zhang vd., 2022). Çevresel bozulma ve ekonomik büyüme arasında ortaya çıkan ters U şeklindeki ilişkiyi açıklayan çevresel Kuznets eğrisi (EKC) hipotezi ilk olarak Grossman ve Krueger (1991) tarafından ortaya konmuştur. EKC hipotezi, bir toplum daha fazla zenginleştikçe bireylerin daha yüksek bir çevre kalitesi talep ettiğini ve buna eşlik eden sanayileşme ve ekonomik üretimin çevresel baskıları artırdığını öne sürmektedir. Bu dinamik, verimliliği artırmayı ve emisyonları azaltmayı amaçlayan yasal önlemlerin ve teknolojik gelişmelerin uygulanmasını teşvik etmektedir (Duran vd., 2023). Son yıllarda EKC hipotezinin geçerliliğini araştıran birçok çalışma çevresel kirlilik göstergesi olarak ekolojik ayak izini dikkate almıştır. EKC hipotezine göre, ekolojik ayak izi ve gayrisafi yurtiçi hasıla (GSYİH) büyümesi ters orantılıdır. Bu ilişki, ekonomik büyüme düzeyi yükseldikçe ekolojik ayak izinin başlangıç aşamasında arttığını ve daha sonra belirli bir eşik aşıldığında ekonomik büyümenin ekolojik ayak izini azalttığını göstermektedir (Zhang vd., 2022).

Mevcut küresel enerji tüketiminin neredeyse %80'i fosil yakıtların kullanımına dayanmaktadır ve bu durum büyük ölçüde dünya çapındaki kirliliğin sorumlusudur (Yilanci ve Pata, 2020). Dolayısıyla artan enerji taleplerini karşılamak ve enerji geçişi yoluyla çevreyi korumak dünyanın enerji sorunuyla karşı karşıya kaldığı iki küresel zorluktur. Bu zorluklar mevcut enerji modelini, minimum çevresel ayak izi olan düşük karbonlu enerjilere geçiş ve kaynak kullanım verimliliği yoluyla gelecek nesiller için enerji üretmek için kullanılan kıt kaynakları korumaya geçmeyi gerektirmektedir (Poinssot vd., 2016). Nükleer ve yenilenebilir enerjiler, son zamanlarda enerji verimliliğinin artması, teknolojik atılımlar ve yapısal reformlar nedeniyle artan bu zorlukların üstesinden gelebilmektedir.

Nükleer enerji, yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarının yerini güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde alma potansiyeline sahiptir ve enerji geçişinde öncü konumdadır (Knapp ve Pevec, 2018). Nükleer enerji, çevresel sürdürülebilirliği artırma ve iklim değişikliğinin yarattığı zorlukların üstesinden gelme kapasitesine sahip önemli bir enerji kaynağı olarak şu anda kilit bir konumdadır. Enerji yapısını optimize etmede, ekolojik istikrarı sağlamada ve hava kirliliğini azaltmada önemli faydalar sunmaktadır (Lau vd., 2019; Sarkodie ve Adams, 2018). Ayrıca, nükleer enerji, iklim değişikliğinin uzun vadeli etkilerini hafifletme potansiyeline

sahiptir. Çevresel iyileştirme ve enerji gelişimine önemli bir katkı sağlayan unsur olarak kabul görmektedir (Pata ve Samour, 2022; Saidi ve Omri, 2020). Bu nedenle, nükleer enerji; uzun vadede küresel ekolojik istikrar, enerji güvenliği ve yeşil büyümeyi hedefleyen çevre politikalarına yardımcı olmak için iyi bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (Sadiq vd., 2022). Nükleer enerjinin bütün bu olumlu etkilerine rağmen, olumsuzluk yaratan durumlarla da karşılaşmak mümkündür. Özellikle nükleer santraller radyoaktif radyasyon ve nükleer reaktör kazaları nedeniyle çevreyi riske atmaya devam etmektedir (Mahmood vd., 2020). Ek olarak, nükleer atıkların bertarafı önemli bir zorluk olmaya devam etmektedir. Çünkü güvenli bir şekilde depolanması zordur ve çevre üzerinde uzun süreli etkileri olabilmektedir (Duran vd., 2023). Bir diğer olumsuz durum ise, mevcut ve potansiyel olarak yeni nükleer tesislerin bir terörist saldırı durumunda önemli çevresel felaketlere neden olabileceği yönündedir (Toth ve Rogner, 2006). Öte yandan, nükleer enerji savunucuları nükleer santrallerin yüksek kurulum maliyetlerine sahip olduğunu ancak fosil yakıtlara kıyasla düşük işletme maliyetlerine sahip olduğunu belirtmektedir (Ahmed vd., 2022). Sonuç olarak, nükleer enerji alternatif bir kaynak olarak büyük ilgi görmesine rağmen, mevcut literatürde hala belirsiz bir konumda yer almaktadır (Bandyopadhyay vd., 2022).

Enerji portföyü içerisinde fosil yakıtların yüksek payının sebep olduğu çevre kirliliği dikkate alındığında politika yapıcılarının alternatif enerji kaynaklarına yönelik yatırımlar gerçekleştirmesi zorunlu hale gelmektedir. Son on yıllarda, yenilenebilir enerji, fosil yakıtlara alternatif olarak akademik alanda önemli bir ilgi görmüştür. Tüm dünyada güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynakları giderek daha popüler hale gelmektedir. 1990 yılında hidroelektrik, güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle enerjisi, dalga ve gelgit enerjisinin dünyadaki payı %6,8 iken bu rakam 2023 yılı sonunda iki kattan fazla artarak %13,94'e ulaşmıştır (Our World in Data, 2025). 2030 yılı sonuna kadar da bu rakamın daha da yükselmesi beklenmektedir. Örneğin Avrupa Birliği Komisyonu, Avrupa Birliği ülkelerinde net sera gazı emisyonlarını en az %42,5 oranında azaltma hedefine ulaşmak ve bu hedefe katkıda bulunmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını hızlandırmak istemektedir. Bu doğrultuda, 2030 yılına kadar yenilenebilir enerjinin payını %45'e çıkarmayı hedeflemektedir (Avrupa Komisyonu, 2025). Yenilenebilir enerji, petrol ve doğalgaz gibi yenilenemez kaynaklara göre daha uygun maliyetli ve çevre dostudur çünkü bu kaynaklar atmosfere CO₂ salmaz ve böylece iklim değişikliğine katkıda bulunmazlar.

Doğrudan yabancı yatırım (DYY) girişleri ev sahibi ülkenin ekonomisini canlandırırken, aynı zamanda düzenlenmemiş endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan kirliliğe de sebep olabilmektedir (Khan ve Ozturk, 2020). DYY ev sahibi ülke için ekonomik olarak faydalı olsa da DYY'lerin çevresel etkileri hala tartışmalı bir konu olmaya devam etmektedir. Bu tartışmalı konuyu ortaya koymak için, çevre ekonomisi literatüründe DYY'nin ekolojik ayak izi üzerindeki etkisine ilişkin tartışmaları çerçevelemek amacıyla kirlilik cenneti hipotezi geliştirilmiştir. Bu hipotez, DYY'nin ekolojik ayak izini nasıl bozduğuna odaklanmaktadır. Kirlilik cenneti hipotezi, sanayileşmiş, gelişmiş ekonomilerin üretim kapasitelerini artırmak ve yeniden konumlandırmak istediklerinde, uluslararası şirketlerin çevre düzenlemelerinin zayıf olduğu ve karbon emisyonlarının fiyatlandırılmadığı ülkelere yatırım yapmaya çalıştıkları varsayımına dayanmaktadır. Bu nedenle, kirlilikci işletmelerin gelişmiş ülkelere taşınması mümkün olabilmektedir (Bulut vd., 2021). Son yıllarda DYY'nin ekolojik ayak izi üzerindeki zararlı etkilerini destekleyen birçok çalışmaya (Ali vd., 2025; Balli vd., 2023; Chishti, 2023; Durmus vd., 2025) rastlamak mümkündür.

Bu araştırmanın temel amacı, 2000-2023 dönemi için, nükleer enerji tüketimi gerçekleştiren 25 ülkede nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kullanımının ekolojik ayak izi üzerindeki potansiyel etkilerini MMQR yöntemini kullanarak analiz etmektir. Ayrıca çalışma, ekonomik büyüme ve doğrudan yabancı yatırım değişkenlerini kullanarak geleneksel EKC ve kirlilik cenneti hipotezlerinin geçerliliğini sorgulamaktadır. Bu doğrultuda, çalışma şu araştırma sorularına cevap aramaktadır: (1) Nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklarının ekolojik ayak izi üzerindeki etkileri hangi düzeydedir? (2) Nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklarından hangisi daha çevrecidir? (3) Analiz gerçekleştirilen ülkelerde EKC hipotezi geçerli midir? (4) DYY girişleri, ekolojik ayak izini arttırır mı? Dengeli bir veri seti kullanılarak yapılan analiz, bu enerji kaynaklarının doğrudan ekolojik ayak izi üzerindeki olası etkilerini, EKC ve kirlilik cenneti hipotezi çerçevesinin nükleer reaktörlere sahip ülkelerdeki önemini araştırmaktadır. Bu çalışma ile literatürdeki şu boşlukların doldurulması hedeflenmektedir: İlk olarak çalışma, nükleer enerji tüketimine sahip olan toplam 31 ülkenin

25'ini inceleyerek geniş bir örneklemde analiz gerçekleştirmektedir. 2023 yılında toplam aktif 441 nükleer reaktörün 357'si bu ülkelerde bulunmaktadır. 441 nükleer reaktörden elde edilen elektrik üretimi aynı yıl 2602 TWs iken, bunun 2355 TWs'i (%90,5) 25 ülke tarafından sağlanmaktadır (Dünya Nükleer Birliği, 2025). Daha önce bu kadar geniş bir örneklemde herhangi bir çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır. Bu açıdan değerlendirildiğinde, nükleer enerji tüketen ülkelere yönelik gerçekleştirilen bu çalışma önemli bir literatür boşluğunu doldurmakta ve daha geniş bir perspektiften nükleer enerjinin ekolojik ayak izi üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. İkinci olarak mevcut araştırma, sürdürülebilir çevresel performansı değerlendirmede CO₂ emisyonlarına göre önemli avantajlar sunan ekolojik ayak izini kullanarak mevcut literatürü zenginleştirmektedir. CO₂ emisyonlarının aksine, ekolojik ayak izi, toplumların toprak ve su gibi kaynakları nasıl kullandığını yansıtmakta ve yenilenme kapasitelerini değerlendirerek çevresel stres ve kaynak kullanımı konusunda daha kapsamlı bir bakış açısı sunmaktadır. Bu çalışma bahsedildiği gibi daha kapsamlı bir ülke grubunu analize dahil ederek farklı değişkenlerin çok boyutlu potansiyel etkilerini inceleyerek literatürü genişletmektedir. Üçüncü olarak çalışma, fosil yakıtlara alternatif olarak değerlendirilen nükleer ve yenilenebilir enerjinin etkilerini değerlendirme fırsatı sunmakta ve hangi enerji kaynaklarının daha çevreci bir yapıya sahip olabileceğini ortaya koyarak politika yapımcılarına emisyonları azaltma ve iklim krizi ile başa çıkmada kullanabilecekleri politikalara rehberlik etmektedir. Dördüncü olarak, DYY'nin ekolojik ayak izi üzerindeki aktif rolünü vurgulayarak, DYY girişlerinin ne tür yatırımlara kanalize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Son olarak çalışma, metodolojik açıdan, Machado ve Silva (2019) tarafından tanıtılan ve farklı değişkenler ile ekolojik ayak izi arasındaki ilişkinin dinamiklerini yalnızca ortalama düzeyde değil, çeşitli yüzdelik dilimlerde de inceleyen MMQR yöntemini kullanmaktadır. Böylece, değişkenin her seviyesi için etki gücü derecesi bağımsız olarak analiz edilebilmektedir.

Bu makalenin yapısı şu şekildedir: Bölüm 2, ekolojik ayak izi ile nükleer, yenilenebilir enerji, EKC ve kirlilik cenneti hipotezi üzerine ilgili literatürü incelemektedir. Bölüm 3, ekonometrik modeli, veri kaynaklarını, değişken tanımlarını ve tahmin stratejilerini açıklamaktadır. Bölüm 4, ampirik sonuçları sunmakta ve bunların çevresel kalite üzerindeki etkilerini tartışmaktadır. Bölüm 5'te; sonuçları özetlemekte, politika önerileri sunulmakta ve gelecekteki araştırmalar için öneriler yapılmaktadır.

2. Literatür İncelemesi

2.1. Ekonomik Büyüme - Ekolojik Ayak İzi İlişkisi

Ekonomik büyüme ve ekolojik ayak izi arasındaki ilişki, genellikle ters U şeklinde bir ilişkiyi öne süren EKC hipotezi çerçevesinde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ekonomik kalkınmanın erken aşamalarında, büyüme genellikle artan sanayileşme, enerji tüketimi ve fosil yakıtlara bağımlılık nedeniyle daha yüksek çevresel bozulmaya yol açmaktadır (Miyan vd., 2026). Bununla birlikte, ekonomiler olgunlaştıkça, daha temiz teknolojilere ve hizmet odaklı endüstrilere doğru yapısal bir kayma, daha güçlü çevre düzenlemeleriyle birlikte, emisyonları ve diğer kirleticileri azaltacağına inanılmaktadır (Grossman ve Krueger, 1995). Ampirik çalışmalar bu ilişki için karışık kanıtlar göstermiştir. Bu çalışmalardan bazıları (Ahmad, 2025; Barak vd., 2024; Georgescu ve Kinnunen, 2025; Hakkak vd., 2023; Magazzino, 2024; Miyan vd., 2026; Nuriddinova ve Ahmad, 2025; Sarkodie ve Adams, 2018; Ximei vd., 2025; Yurtkuran vd., 2025) EKC hipotezinin geçerliliğini doğrularken, bazı çalışmalar ise (Aslan vd., 2022; Massagony ve Budiono, 2023; Yilanci ve Pata, 2020) EKC hipotezinin varlığını kanıtlayamamıştır. Bu karmaşık sonuçlar daha çok metodolojilerin, veri kaynaklarının, ülke ve ülke gruplarının değişkenlik göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bu çalışma, başlangıçta ekonomik büyümenin ekolojik ayak izini arttıracaklarını, ancak dönüm noktasından sonra örneklem bağlamında ekolojik ayak izini azaltacaklarını ve EKC hipotezinin ters U şeklindeki doğrusal olmayan yapıya sahip olacağını öngörmektedir.

2.2. Nükleer Enerji - Ekolojik Ayak İzi İlişkisi

Literatür incelemesi, nükleer enerji ile ekolojik ayak izi arasındaki bağlantının ekonomi bağlamında geniş çapta tartışıldığını ve nükleer enerjinin ekonomik etkilerinin çeşitli açılardan analiz edildiğini ortaya koymaktadır. Bu ekonomik analizler aracılığıyla araştırmacılar, nükleer enerji ile ekolojik ayak izi arasındaki

karmaşık bağlantıyı daha iyi anlamaya çalışmışlardır. Nükleer enerji, düşük karbonlu bir ekonomiye ulaşmada akademisyenler ve politika yapıcılar arasında büyük ilgi görse de nükleer enerjinin ekolojik ayak izini arttırdığına ya da azalttığına yönelik genel bir ortak kanağe varılamamıştır. Örneğin, Dong vd. (2018), Çin verilerini kullanarak EKC çerçevesinde CO₂ emisyonları, ekonomik büyüme, fosil yakıt tüketimi, nükleer enerji ve yenilenebilir enerji arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Bulgular, nükleer enerjinin hem kısa hem de uzun vadede karbon emisyonlarını azaltmada önemli roller oynadığını ortaya koymaktadır. Mehboob vd. (2024), 1990-2021 dönemi verilerini kullanarak nükleer reaktöre sahip beş ülke özelinde gerçekleştirdikleri çalışmada, nükleer enerji tüketiminin çevresel bozulmayı azaltarak ekolojik ayak izini azalttığı bulgusuna ulaşmışlardır. Başka bir çalışmada ise Usman vd. (2022), 1980-2015 dönemi boyunca 12 gelişmiş ekonomide nükleer enerji ve insan sermayesinin ekolojik ayak izi üzerindeki etkisini CS-ARDL tahmincisiyle araştırmışlardır. Çalışmanın bulguları nükleer enerjinin negatif anlamlılık gösterdiğini; bu da nükleer enerji kullanımının su, toprak ve orman kaynaklarını koruyarak ve karbon ayak izini azaltarak çevreyi koruyabileceğini göstermektedir. OECD ülkeleri için Hassan vd. (2023), Birleşik Krallık için Özbek ve Naimoğlu (2025), Pakistan için Ullah ve Lin (2024) benzer sonuçlar elde ederek nükleer enerjinin ekolojik ayak izini azalttığını ortaya koymuşlardır. Buna rağmen, nükleer enerjinin ekolojik ayak izini arttırdığına dair çalışmalar (Georgescu ve Kinnunen, 2025; Kartal, 2022; Sarkodie ve Adams, 2018; Xu vd., 2025) literatürde yer almaktadır. Nükleer enerjinin ekolojik ayak izi üzerindeki bu karmaşık yapısı dikkate alındığında, nükleer enerjinin ekolojik ayak izi üzerindeki etkisinin pozitif/negatif olacağı öngörülmektedir.

2.3. Yenilenebilir Enerji - Ekolojik Ayak İzi İlişkisi

Yenilenebilir enerji kullanımı ile ekolojik ayak izi arasındaki bağlantı konusunda literatürde farklı sonuçlar bulunmaktadır. Ampirik araştırmalar yenilenebilir enerjinin ekolojik ayak izini nasıl etkilediği konusunda büyük ölçüde üç bulguya ulaşmıştır (Hakkak vd., 2023). Birincisi, birçok çalışma, yenilenebilir enerji kullanımındaki artışın ekolojik ayak izini azalttığına ve çevrenin durumunda iyileşmeye yol açtığını tutarlı bir şekilde göstermiştir. Abid vd. (2022), 1980-2017 döneminde ARDL yöntemiyle ekonomik büyümenin çevresel işlevdeki önemli rolünü dikkate alarak, Suudi Arabistan'da yenilenebilir enerji tüketimi ile ekolojik ayak izi arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Bulgular, yenilenebilir enerji tüketimindeki artışın ekolojik ayak izini azalttığını ortaya koymuştur. Liu vd. (2025), özellikle BRICS ülkelerini ele alarak yenilenebilir enerji, doğal kaynak zenginliği ve çevresel etkileri incelemişler, ekolojik ayak izinin yenilenebilir enerjiyle azaldığını kanıtlamışlardır. Wang vd. (2025), 1995-2018 yılları arasında 36 OECD ülkesinde ekonomik verimlilik, finansal kalkınma, yenilenebilir enerji, sanayileşme ve ekolojik ayak izi arasındaki ilişkiyi FMOLS tekniğini kullanarak incelemişlerdir. Elde edilen bulgular, yenilenebilir enerjinin ilerlemesinin ekolojik ayak izini kontrol etmede ve çevre korumayı teşvik etmede önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur.

Aksine, bir dizi çalışmaya göre yenilenebilir enerji kullanımı ve ekolojik ayak izi arasında anlamlı bir korelasyon bulunmamaktadır. Pata ve Samour (2022), Fransa özelinde gerçekleştirdikleri çalışmada yenilenebilir enerjinin ekolojik ayak izi üzerinde uzun vadeli bir etkisinin olmadığı bulgusuna ulaşmışlardır. Menyah ve Wolde-Rufael (2010), ABD için gerçekleştirdikleri bir çalışmada CO₂ emisyonları ile yenilenebilir enerji kullanımı arasında bir ilişkinin olmadığı ortaya koymuşlardır. Benzer başka bir çalışmada Khoshnevis Yazdi ve Shakouri (2018), 1975-2014 dönemi boyunca Almanya'da CO₂ emisyonları ile ekonomik büyüme, yenilenebilir enerji tüketimi ve enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi ARDL yaklaşımı ve vektör hata düzeltme modeliyle analiz etmişlerdir. Bulgular, yenilenebilir enerji tüketiminin artan payının ekolojik ayak izi üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını göstermiştir.

Üçüncü görüş, yenilenebilir enerji kullanımının ekolojik ayak izini arttırdığını göstermektedir. Örneğin, Hu vd. (2018), DOLS, Granger nedensellik testi ve FMOLS yöntemlerini kullanarak 25 gelişmekte olan ülkede yenilenebilir enerji tüketimindeki artışın emisyonlarda bir artışa yol açtığını göstermişlerdir. Xu vd. (2022), Brezilya'da 1970 ile 2017 yılları arasındaki dönemde finansal küreselleşme, kentleşme, ekonomik büyüme ve yenilenebilir ve yenilenemez enerji kullanımının yük kapasitesi faktörü üzerindeki etkisini incelemişler ve yenilenebilir enerjinin yük kapasitesi faktörünü azalttığını ortaya koymuşlardır. Son olarak Huilan vd. (2024), Meksika'da yenilenebilir enerji tüketimi ve ticaret açıklığının yük kapasitesi faktörü üzerindeki etkisini incelemek için 1970-2017 dönemine ait verileri analiz etmişlerdir. Elde edilen bulgular, yenilenebilir enerjinin

yük kapasite faktörünü azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe zarar verdiğini göstermiştir. Yenilenebilir enerjinin çevresel kalite üzerindeki bu karmaşık yapısı dikkate alındığında, yenilenebilir enerjinin ekolojik ayak izi üzerindeki etkisinin pozitif/negatif olabileceği öngörülmektedir.

2.4. Doğrudan Yabancı Yatırımlar - Ekolojik Ayak İzi İlişkisi

Kirlilik cenneti hipotezi, şirketlerin maliyetlerini düşürmek için üretimlerini daha zayıf çevre düzenlemelerine sahip ülkelere taşıyacaklarını öne süren bir ekonomik teodir (Chirilus ve Costea, 2023). Bu teodinin geçerliliğine dair birçok çalışma yapılmıştır. Bekun vd. (2023), 1970-2016 yılları arasındaki yıllık zaman serisi verilerini kullanarak kirlilik cenneti hipotezinin geçerliliğini test etmişler, Türkiye örneğinde uzun vadede kirlilik cenneti hipotezini doğrulamışlardır. Başka bir çalışmada Naqvi vd. (2023), 1990-2017 yılları arasındaki verileri kullanarak 87 orta gelirli ülkede DYY, ekonomik büyüme, doğal kaynaklar, kentleşme, biyokütle enerji kullanımı ve ekolojik ayak izi arasındaki ilişkiyi AMG ve Dumitrescu-Hurlin nedensellik testini uygulayarak incelemişlerdir. Ampirik bulgular, artan yabancı doğrudan yatırımın orta gelirli ülkelerde artan ekolojik ayak izinin nedeni olması nedeniyle kirlilik cenneti hipotezini desteklemiştir. Wang vd. (2022), 1990-2018 yılları arasında 32 OECD ülkesinin çevresel bozulması üzerindeki biyokütle enerji tüketimi ve DYY'nin etkisini, EKC hipotezi çerçevesinde incelemişlerdir. Uzun vadeli bulgular, DYY'nin çevresel kalite üzerinde baskı oluşturduğunu ve kirlilik cenneti hipotezini desteklediğini göstermiştir. Kirlilik cenneti hipotezinin geçerliliğine dair benzer sonuçlar, Balli vd. (2023), Hassen vd. (2025), Holtbrügge ve Raghavan (2025) tarafından da elde edilmiştir.

Diğer yandan DYY'nin çevre kalitesini arttırdığına yönelik sonuçlara (Mert ve Caglar, 2020; Pilatin vd., 2025; Saqib vd., 2023) da ulaşılmıştır. DYY'nin ekolojik ayak izi üzerindeki bu karmaşık yapısı dikkate alındığında, DYY'nin ekolojik ayak izi üzerindeki etkisinin pozitif/negatif olabileceği öngörülmektedir.

3. Metodoloji

3.1. Veri

Ülkeler arasında veri bütünlüğünün sağlanabilmesi için 2000-2023 yılları arasında temel değişkenlere göre nükleer enerji tüketimi gerçekleştiren 25 ülkeden oluşan bir örneklem seçilmiştir (Tablo 1). Çevresel kalite göstergesi olarak ekolojik ayak izi, modelde bağımlı değişken olarak kullanılmıştır. Bağımlı değişken için veri kaynağı Küresel Ekolojik Ayak İzi Ağı'dır (Global Footprint Network). Küresel Ekolojik Ayak İzi Ağı sürdürülebilir kaynak yönetimini ölçmeye ve teşvik etmeye odaklanan uluslararası bir araştırma kuruluşudur (Global Footprint Network, 2025). Nükleer enerji ve yenilenebilir enerji tüketimine ait veriler küresel ısınma ve iklim değişikliğine karşı ilerleme kaydetmek için araştırma ve verileri yayımlama misyonuna sahip olan "Our World in Data (2025)" veri tabanından elde edilmiştir. Ekonomik büyüme (GDP) ve doğrudan yabancı yatırımlara (DYY) ait veriler ise "Dünya Bankası Dünya Kalkınma Göstergeleri" veri tabanından elde edilmiştir. Dünya Kalkınma Göstergeleri, Dünya Bankası tarafından yayınlanan ve ekonomik ve sosyal kalkınma göstergelerine ilişkin ülkeler arası verilerin kapsamlı bir derlemesini sağlayan bir veri tabanıdır (Dünya Bankası, 2025). Bu çalışmada kullanılan ülkeler ve değişkenlerin kısaltmaları, açıklamaları, kaynakları ve beklenen işaretleri Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Veri analizi ve modelleme için, DYY dışındaki tüm değişkenlerin verileri logaritmik formlara dönüştürülmüştür. DYY değişkeni negatif değerler içerdiğinden, eksik gözlemlere neden olmamak için logaritması alınmamıştır. Bunun sebebi tutarlılığı artırmak, daha doğru, güvenilir ve etkin ampirik bulgular elde etmektir (Cameron, 1994; Dai vd., 2024).

Tablo 1. Analize Dahil Edilen Ülkeler

ABD	Arjantin	Belçika	Birleşik Krallık	Brezilya
Bulgaristan	Çekya	Çin	Fransa	Finlandiya
Güney Afrika	Güney Kore	Hindistan	Hollanda	İspanya
İsveç	İsviçre	Kanada	Macaristan	Meksika
Pakistan	Romanya	Rusya	Slovakya	Slovenya

3.2. Model

Çalışma, ampirik modelleme için Mehboob vd. (2024), Sadekin (2025), Umair vd. (2023) ve Usman vd. (2022) çalışmalarını takip etmekte ve fonksiyonel formu eşitlik (1)'de gösterilmektedir:

$$EF = f(NE, RE, GDP, GDP^2, DYY) \quad (1)$$

Burada EF ekolojik ayak izini, NE ve RE sırasıyla nükleer ve yenilenebilir enerji tüketimini, GDP/GDP² kişi başına düşen Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYİH) ve karesini ve DYY ise doğrudan yabancı yatırımları ifade etmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi DYY değişkeni hariç diğer tüm değişkenlerin verileri logaritmik formlara dönüştürülmüş ve nihai model eşitlik (2)'de gösterilmektedir:

$$LEF_{it} = \alpha_0 + \varphi_1 LNE_{it} + \varphi_2 LRE_{it} + \varphi_3 LGDP_{it} + \varphi_4 LGDP_{it}^2 + \varphi_5 DYY_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

Burada i kesitleri (ülkeleri), t zamanı (2000-2023), ε stokastik hata terimini, α_0 sabit terimi, φ_1 'den φ_5 'e kadar olan değerler ise bağımsız değişkenlere ait katsayıları ifade etmektedir.

Tablo 2. Değişkenlerin Açıklaması

Değişken	Kısaltma	Açıklama	Kaynak	Beklenen işaret
Ekolojik Ayak İzi	EF	Küresel kişi başına düşen hektar	Küresel Ekolojik Ayak İzi Ağı (2025)	-
Nükleer Enerji	NE	Kişi başı nükleer enerji tüketimi (kilowatt saat)	Our World in Data (2025)	(+/-)
Yenilenebilir Enerji	RE	Kişi başı yenilenebilir enerji tüketimi (kilowatt saat)	Our World in Data (2025)	(+/-)
Ekonomik Büyüme	GDP/GDP ²	Kişi başı gelir / Kişi başı gelirin karesi (sabit 2015 ABD doları)	Dünya Bankası Dünya Kalkınma Göstergeleri (2025)	(+/-)
Doğrudan Yabancı Yatırımlar	DYY	Net girişler (GSYİH'nin yüzdesi)	Dünya Bankası Dünya Kalkınma Göstergeleri (2025)	(+/-)

3.3. Tahmin Stratejisi

Çalışma, Şekil 1'de görsel olarak gösterilen altı aşamalı bir ekonometrik tahmin stratejisini takip etmektedir. Birinci aşamada, tanımlayıcı istatistikler, korelasyon matrisi ve varyans büyütme faktörü (VIF) değerleri gibi değişkenlerin ön istatistikleri incelenmektedir. VIF değerleri 5'in altında ve korelasyon katsayıları düşükse, çoklu doğrusallık sorunu olmadığı varsayılabilir (Pata vd., 2023).

İkinci aşamada, çalışmada panel verilerinde eğim heterojenliğinin ve yatay kesit bağımlılığının (CSD) varlığı incelenmektedir. Eğim heterojenliği modelin seçimini önemli ölçüde etkilemektedir (Dai vd., 2024). Pesaran ve Yamagata'nın (2008) tahmincisi dikkate alınarak $\tilde{A}_{SH}$ and $\tilde{A}_{ASH}$ testleri kullanılmaktadır. Burada eğim katsayılarının homojenliğini destekleyen sıfır hipotezi, eğim katsayılarının heterojenliğine izin veren alternatif hipoteze karşı kurulmaktadır (Javed vd., 2025). CSD'nin varlığı, ekonomik entegrasyon ve küreselleşme göz önüne alındığında bir ülkedeki siyasi, ekonomik veya sosyal bir şokun diğer ülkelere yayılabileceği anlamına gelmektedir. Bu durumda, CSD'yi hesaba katmayan geleneksel panel veri yöntemleri yanıltıcı tahminlere neden olabilir (Pata vd., 2023; Tekin ve Shahbaz, 2025; Umair vd., 2023). Bu nedenle, CSD'nin varlığı Breusch-Pagan LM (1980), uyarlanmış (adjusted) LM (2012) ve Pesaran'ın CD (2004) testi kullanılarak analiz edilmektedir.

Üçüncü aşamada, değişkenler arasındaki entegrasyon derecesini araştırmak için ikinci nesil birim kök testleri kullanılmaktadır. CSD ve eğim heterojenliğine dair kanıtlar göz önüne alındığında, birinci nesil birim kök testlerinin kullanılması uygun değildir. İkinci nesil yaklaşımların kullanımı çeşitli avantajlar sunmaktadır. Panel çalışmalarında CSD'yi dikkate almaktadırlar. Aynı zamanda panel verileri genelindeki karşılıklı

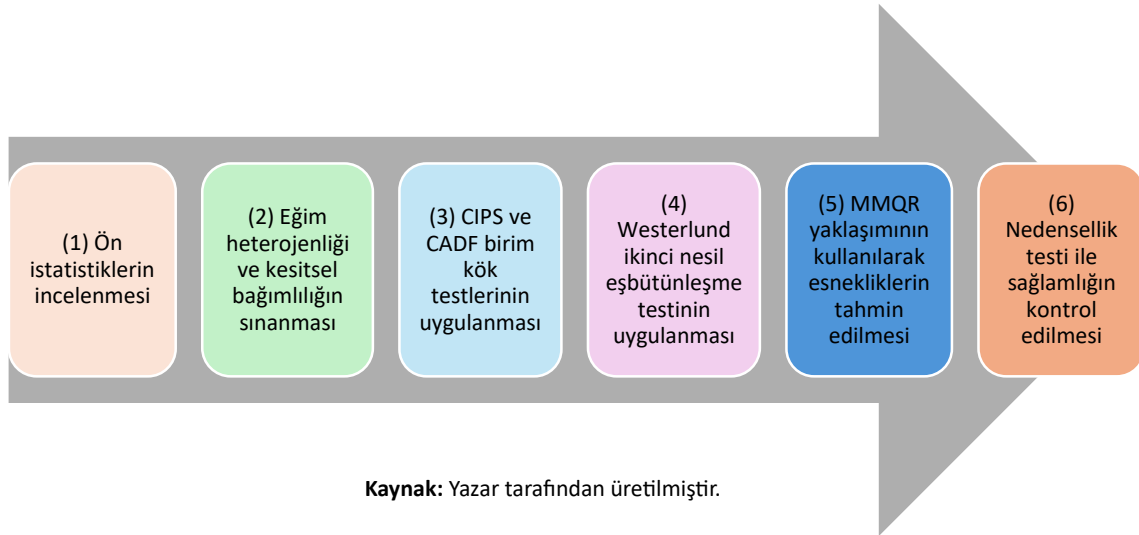
bağımlılıkları ve eğilimleri hesaba katmaktadırlar ve birinci nesil yaklaşımların aksine tutarlı tahminler sağlamaktadırlar (Zafar vd. 2022). Bu koşullar altında sağlamlığını koruyan ikinci nesil kesitsel olarak genişletilmiş Im-Pesaran-Shin (CIPS) ve CADF testleri kullanılmaktadır (Javed vd., 2025; Prempeh vd. 2024). Her iki test de $T > N$ veya $N > T$ olan panelleri kapsamaktadır (Nathaniel vd., 2021).

Dördüncü aşamada, Westerlund (2007) tarafından önerilen ikinci nesil eşbütünleşme testi, modelin heterojen yapısına uygun olarak uygulanmaktadır. CSD ve heterojenlik dikkate alındığında, birinci nesil eşbütünleşme testlerinin uygulanması yetersiz kalmaktadır (Javed vd., 2025). Bu nedenle, ikinci nesil eşbütünleşme testlerinden olan ve bootstrap yöntemi kullanılarak hesaplanan Westerlund hata düzeltme tabanlı eşbütünleşme testinin kullanılması uygun olmaktadır. Bu yaklaşım, örneklem büyüklüklerine rağmen tutarlı sonuçlar vermekte ve kalıntı tabanlı eşbütünleşme testinde yüksek verimlilik göstermektedir (Ali vd., 2025). Westerlund eşbütünleşme testi dört istatistik kullanmaktadır: İki grup ortalaması (Ga ve Gt) ve iki panel istatistiği (Pa ve Pt). Ga ve Gt tüm grup genelinde eşbütünleşme ilişkilerini değerlendirirken, Pa ve Pt kesitler içindeki eşbütünleşme ilişkilerini değerlendirmektedir (Ayad vd., 2025). Eşbütünleşme analizi, değişkenler arasında uzun vadeli denge ilişkilerini belirlemektedir (Murshed vd. 2020; Nathaniel vd., 2021; Pata ve Caglar 2021).

Beşinci aşamada, bağımsız değişkenlerin (NE, RE, kişi başı GDP/GDP², DYY) bağımlı değişken (EF) üzerindeki heterojen etkilerini farklı kantiller (Q0.10, Q0.25, Q0.50, Q0.75, Q0.90) boyunca açıklamak için MMQR kullanılmaktadır.

Ampirik analizin son aşaması olan altıncı aşamada ise bağımlı değişken EF ile seçilen bağımsız değişkenler (NE, RE, kişi başı GDP/GDP², DYY) arasındaki nedensel ilişkinin incelenmesi gerçekleştirilmektedir. Bu amaca ulaşmak için Dumitrescu-Hurlin (2012) tarafından geliştirilen nedensellik testi uygulanmaktadır. Politika oluşturma açısından modelde kullanılan bağımsız değişkenler ile ekolojik ayak izi arasındaki nedensel bağlantıların incelenmesi bu testin uygulanmasının temel amacını oluşturmaktadır.

Şekil 1. Tahmin Stratejisinin İncelenmesi



4. Ampirik Sonuçlar ve Tartışma

4.1. Ön Test Sonuçları

Tablo 3, tanımlayıcı istatistikleri, korelasyon matrisini ve VIF sonuçlarını sunmaktadır. Serideki en yüksek maksimum değere sahip değişken kişi başı LGDP², en düşük maksimum değere sahip değişken ise LEF'dir. LEF'nin ve DYY'nin minimum değerleri negatiftir, diğer değişkenlerin minimum değerleri ise pozitifdir. Korelasyon analizi sonuçlarına bakıldığında, LEF ile bağımsız değişkenler arasında pozitif bir korelasyon vardır. LEF ile kişi başı LGDP/LGDP² ve LNE arasında güçlü bir pozitif korelasyon (0,8695, 0,8465 ve 0,8465)

bulunurken, LEF ile LRE arasında orta düzeyde pozitif bir korelasyon (0,5214) ve LEF ile DYY arasında ise düşük düzeyde bir pozitif korelasyon (0,1219) bulunmaktadır. Ayrıca, C panelinde gösterildiği gibi, tüm bireysel VIF değerleri ve 2,09'luk ortalama VIF değeri, geleneksel 10 eşiğinin oldukça altında kalmaktadır. Ayrıca tolerans değerleri 0,30'un üzerindedir. Bu, modellerde önemli çoklu doğrusallık sorunlarının bulunmadığını doğrulamaktadır.

Tablo 3. Ön Test Sonuçları

Değişkenler	LEF	LNE	LRE	LGDP	LGDP ²	DYY
Gözlem	600	600	600	600	600	600
Ortalama	1,427126	7,638701	7,893826	9,676873	94,82021	4,149005
Std. Sapma	0,5842161	1,759688	1,345763	1,086418	20,19247	10,01227
Minimum	-0,328504	2,830858	4,238389	6,628972	43,94327	-40,10825
Maksimum	2,396075	10,06066	10,47409	11,41426	130,2854	105,6358
LEF	1,000					
LNE	0,8465	1,000				
LRE	0,5214	0,5070	1,000			
LGDP	0,8695	0,7657	0,6457	1,000		
LGDP ²	0,8465	0,7522	0,6471	0,9974	1,000	
DYY	0,1219	0,0544	-0,0808	0,0713	0,0671	1,000
	VIF	1/VIF				
LGDP	3,13	0,319912				
LNE	2,42	0,413450				
LRE	1,77	0,566525				
DYY	1,03	0,967318				
Mean VIF	2,09					

4.2. Eğitim Homojenliği ve CSD'nin Kontrolü

Daha önce de bahsedildiği gibi eğitim heterojenliği modelin seçiminin gerçekleştirilmesinde önemlidir. Bu çalışmada eğitim homojenliği Pesaran ve Yamagata (2008) tarafından geliştirilen 2 test olan delta ($\tilde{\Delta}_{SH}$) and uyarlanmış delta ($\tilde{\Delta}_{ASH}$) testleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu testlere ait matematiksel gösterimler şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\tilde{\Delta}_{SH} = \sqrt{N} \left(\frac{N^{-1}\tilde{S}-k}{\sqrt{2k}} \right) \quad (3)$$

$$\tilde{\Delta}_{ASH} = \sqrt{N} \left(\frac{N^{-1}\tilde{S}-E(\tilde{z}_{it})}{\sqrt{var(\tilde{z}_{it})}} \right) \quad (4)$$

Pesaran ve Yamagata (2008) tarafından geliştirilen delta ($\tilde{\Delta}_{SH}$) and uyarlanmış delta ($\tilde{\Delta}_{ASH}$) testlerine ait sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur. Tablo 4'e göre, $\tilde{\Delta}_{SH}$ ve $\tilde{\Delta}_{ASH}$ test istatistikleri, eğitim katsayılarının homojen olmadığını bir diğer ifadeyle heterojen bir yapıya sahip olduğunu doğrulamaktadır.

Tablo 4. Pesaran ve Yamagata (2008) Eğitim Homojenliği Test Sonuçları

Test	Test değeri	Olasılık değeri (p-value)
$\tilde{\Delta}_{SH}$	12,622***	0,000
$\tilde{\Delta}_{ASH}$	14,997***	0,000

***, %1'lik anlamlılık düzeyini göstermektedir.

Bir sonraki aşamada, çalışma Breusch-Pagan LM (1980), uyarlanmış LM (2012) ve Pesaran'ın CD (2004) testlerini kullanarak CSD'yi kontrol etmektedir. Bu testlerin en önemlisi Pesaran'ın (2004) CD testidir. Bu testin denklemi şu şekilde gösterilebilir:

$$CD = \sqrt{\frac{2T}{N(N-1)}} \left(\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \hat{\rho}_{ij} \right) \quad (5)$$

Bu üç teste ait sonuçlar Tablo 5'te sunulmuştur. Bu ampirik bulgular, sıfır hipotezi olarak CSD'nin yokluğunun reddedildiğini ve panelde CSD'nin varlığını gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bir diğer ifadeyle, tüm CSD testleri, kesitler arasında CSD'nin yokluğuna ilişkin sıfır hipotezinin %1 anlamlılık düzeyinde reddedilmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu bulgulara göre, örnek ülkelerden birinde meydana gelen öngörülemeyen bir şok diğer ülkelere yayılabilmektedir.

Tablo 5. CSD Test Sonuçları

Değişkenler	CD-testi	Olasılık
LEF	16,017***	0,000
LNE	1,046	0,295
LRE	40,066***	0,000
LGDP	72,712***	0,000
LGDP ²	72,628***	0,000
DYY	18,089***	0,000
Breusch-Pagan LM testi	506,1***	0,0000
Uyarlanmış (adjusted) LM testi	14,55***	0,0000

4.3. Panel Birim Kök Testi Sonuçları

Birim kök analizi, verilerin doğruluğunu ve güvenilirliğini teyit etmek, doğru veri dönüştürme ve modellemeye rehberlik etmek, yanıltıcı sonuçlardan kaçınmak ve ekonomik tahminlerin ve bulguların doğruluğunu artırmak için çok önemlidir (Xu vd., 2023). En uygun birim kök testini seçmek için öncelikle eğim heterojenlik ve CSD testleri uygulanmalıdır (Pata vd., 2023). Heterojenlik ve CSD test sonuçları dikkate alınarak, ikinci nesil birim kök testlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu bağlamda, değişkenlerin durağanlıkları CIPS ve CADF testleri kullanılarak incelenmiştir. Bu teknik, panel yöntemlerinde etkilidir, büyük panel gözlemleri için faydalıdır ve erken nesil panel birim kök testindeki kesitsel varyasyonun sınırlamalarını ele almaktadır (Saif vd., 2025). Pesaran (2007) tarafından geliştirilen CIPS ve CADF testleri CSD'ye karşı dirençlidir. CADF modeli şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\Delta y_{it} = \alpha_i + \beta_i y_{i,t-1} + c_i \bar{y}_{t-1} + \sum_{j=0}^p d_{ij} \Delta \bar{y}_{t-j} + \sum_{j=1}^p \delta_{ij} \Delta y_{i,t-j} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

Burada, $\bar{y}_{t-1}$ ve $\Delta \bar{y}_{t-j}$, her bölüm için birinci farkların ve gecikmelerin ortalamalarını ifade etmektedir. CADF elde edildikten sonra, CIPS istatistiği aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$CIPS = N^{-1} \sum_{i=1}^N CADF_i \quad (7)$$

CIPS ve CADF testine ait sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur. LNE, kişi başı LGDP ve LGDP² değişkenlerinin düzeylerinde (I(0)) durağan olmadığı, ancak birinci fark alma işleminden sonra durağan hale geldiği ve birinci dereceden entegre olduklarını (I(1)) gösterdiği bulunmuştur. Buna karşılık, LEF, LRE ve DYY hem düzeyde hem de birinci farkta durağanlık göstermektedir. Ayrıca CADF test sonuçları, LEF ve LNE'nin birinci farktan sonra durağan hale geldiğini, LRE, LGDP, LGDP² ve DYY değişkenlerinin ise düzeyde

durağanlaştığını ortaya koymaktadır. Bir başka ifadeyle, tüm değişkenler ya düzeyde ya da birinci farkta durağandır; bu da modellerin karma bir düzende entegre olduğunu göstermektedir. Seriler arasındaki bu karışık entegrasyon derecesi, eşbütünleşme analizi yoluyla potansiyel uzun vadeli denge ilişkisinin test edilmesinin önemini vurgulamaktadır (Dai vd., 2024; Nathaniel vd., 2021).

Tablo 6. Birim Kök Test Sonuçları

Değişkenler	CIPS		CADF	
	Düzye (I(0))	Birinci Fark (I(1))	Düzye (I(0))	Birinci Fark (I(1))
LEF	-2,959***	-4,862***	-1,647	-2,482***
LNE	-2,551	-4,933***	-0,899	-2,734***
LRE	-2,824***	-5,446***	2,000*	-2,617***
LGDP	-2,559	-3,482***	-2,108**	-2,220***
LGDP ²	-2,475	-3,466***	-2,147**	-2,204***
DYY	-3,682***	-5,881***	-2,007*	-2,931***

***%1, **%5, *%10 anlamlılık düzeyini göstermektedir.

4.4. Eşbütünleşme Testi Sonuçları

Daha önce de bahsedildiği gibi CSD ve eğim heterojenliği dikkate alındığında birinci nesil eşbütünleşme testleri yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, ikinci nesil eşbütünleşme testlerinin uygulanması gerekmektedir. Bu doğrultuda, ikinci nesil eşbütünleşme testlerinden olan ve dört farklı istatistik kullanan Westerlund (2007) eşbütünleşme testi kullanılmıştır. Dört istatistiğe ait eşbütünleşme testlerinin gösterimleri şu şekildedir:

$$G_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{T \hat{\alpha}_i}{\hat{\alpha}_i(1)} \quad (8)$$

$$G_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\hat{\alpha}_i}{SE(\hat{\alpha}_i)} \quad (9)$$

$$P_a = T \hat{\alpha} \quad (10)$$

$$P_t = \frac{\hat{\alpha}}{SE(\hat{\alpha})} \quad (11)$$

Tablo 7'deki sonuçlar, “eşbütünleşme yok” şeklindeki sıfır hipotezine karşı önemli kanıtların bulunduğunu ve bunun eşbütünleşme testiyle desteklendiğini açıklığa kavuşturmaktadır. Westerlund (2007) eşbütünleşme testi bulguları, değişkenlerde uzun vadeli ilişkilerin varlığını göstermektedir.

Tablo 7. Westerlund (2007) Eşbütünleşme Test Sonucu

İstatistik	Değer	Z-value	P-value	Robust P-value
Gt	-2,720	-2,565	0,005	0,007
Ga	-5,863	3,817	1,000	0,408
Pt	-11,819	-1,973	0,024	0,026
Pa	-6,390	1,032	0,849	0,106

4.5. MMQR Sonuçları

Machado ve Silva (2019) tarafından geliştirilen sabit etkili MMQR yöntemi, bu araştırmada ekolojik ayak izinin dağılımındaki farklı noktalarda değişkenlerin heterojen etkilerini belirlemek için kullanılmaktadır. Kantil düzeyinde heterojen etkileri araştırmak için istatistiksel seçenekleri değerlendirirken, MMQR yaklaşımı iyi bir istatistiksel seçimdir (Ohajionu vd., 2022). Bağımsız bir değişkenin belirli yüzdelik dilimlerdeki etkileri ve çeşitli düzeyler, ölçekler ve yüzdelik dilimler üzerindeki etkileri hakkında bilgi sunabilme yeteneği, MMQR tahmincisinin dikkate değer bir avantajıdır (Tekin ve Shahbaz, 2025). MMQR, veriler bireye özgü etkilere göre kategorize edildiğinde değişkenlerin içsellik gösterdiği durumlarda daha uygun görülmektedir. Doğrusal olmayan modeller söz konusu olduğunda, bu ekonometrik model iyi çalışmaktadır (Ali vd., 2025).

MMQR sonuçları, bağımsız değişkenlerin (LNE, LRE, LGDP, LGDP² ve DYY) bağımlı değişken (LEF—Ekolojik Ayak İzi) üzerindeki farklı kantillerdeki çeşitli etkilerine ilişkin bilgiler sunmaktadır ve bu bilgiler Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8. MMQR Tahmin Sonuçları

Değişken	Kantiller						
	Location	Scale	Q0.10	Q0.25	Q0.50	Q0.75	Q0.90
LNE	0,1156*** (0,00690)	0,0018 (0,00433)	0,1129*** (0,00732)	0,1140*** (0,00639)	0,1152*** (0,00662)	0,1171*** (0,00901)	0,1189*** (0,01232)
LRE	-0,0219*** (0,007579)	0,0054 (0,00475)	-0,0299*** (0,008042)	-0,0264*** (0,00702)	-0,0229*** (0,00728)	-0,0173* (0,00991)	-0,0120 (0,013528)
LGDP	2,0785*** (0,10937)	-0,1775*** (0,06863)	2,3407*** (0,00616)	2,2257*** (0,10153)	2,1110*** (0,10527)	1,9279*** (0,14380)	1,7570*** (0,19459)
LGDP ²	-0,0937*** (0,00580)	0,0099*** (0,00364)	-0,1084*** (0,00616)	-0,1019*** (0,00538)	-0,0955*** (0,00558)	-0,0853*** (0,00763)	-0,0758*** (0,01031)
DYY	0,0023*** (0,00087)	0,0003 (0,00055)	0,0018** (0,00093)	0,0020*** (0,00081)	0,0023*** (0,00084)	0,0027** (0,00114)	0,0030** (0,00156)
Sabit	-10,515*** (0,49861)	0,8732*** (0,31288)	-11,804*** (0,52972)	-11,239*** (0,46297)	-10,675*** (0,48004)	-9,7746*** (0,65596)	-8,9342*** (0,88701)
Gözlem	600	600	600	600	600	600	600

***, **, * sırasıyla %1, %5 ve %10 anlamlılık düzeyini ifade etmektedir. Parantez içerisindeki rakamlar standart hataları göstermektedir.

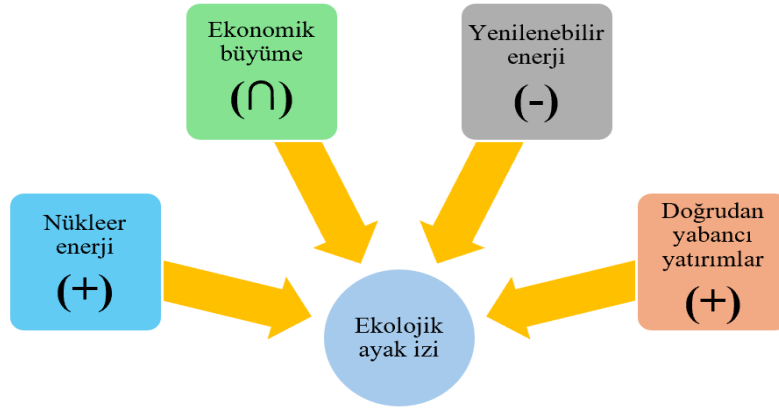
Tablo 8, LNE’nin tüm kantillerde LEF üzerinde olumsuz ve önemli bir etki yarattığını göstermektedir. LNE’deki her %1’lik artışla, LEF’de önemli bir kötüleşme gözlemlenmektedir; bu olumsuz durum Q0.10’da %0,113 Q0.25’te %0,114, Q0.50’de %0,115, Q0.75’te %0,117 ve Q0.90’da ise %0,119 olarak ölçülmüştür. LNE’nin LEF üzerindeki olumsuz etkisi, alt kantillerden (Q0.10) üst kantillere doğru kademeli bir artış göstererek en yüksek kantilde (Q0.90) en önemli olumsuz bir etkiye ulaşmaktadır. Veriler, nükleer enerji tüketimi gerçekleştiren 25 ülkede ekolojik ayak izi dağılımının tamamında LNE ile LEF arasında negatif bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Bu, analize dahil edilen ülkelerde olumsuz çevresel etkinin nükleer enerji kullanımının artmasıyla sürekli olarak arttığını göstermektedir. Burada sunulan bulgular, Sarkodie ve Adams (2018) tarafından 1971-2017 dönemindeki veriler kullanılarak ARDL yöntemiyle Güney Afrika için elde edilen bulgularla örtüşmektedir. Benzer şekilde Kartal (2022) tarafından en çok karbon salımı yapan beş ülkede nükleer enerji kullanımı ile çevre arasındaki ilişki incelenmiş ve bulgular, nükleer enerji kullanımının bu ülkelerin bazılarında olumsuz ekolojik sonuçlara yol açtığını göstermiştir. Georgescu ve Kinnunen (2025) Finlandiya özelinde gerçekleştirdikleri çalışmada nükleer enerjinin atık endişeleri nedeniyle ekolojik ayak izini arttırdığını ortaya koyan sonuca ulaşmışlardır. Yakın zamanda Xu vd. (2025) BRICS ülkelerinde nükleer enerjinin çevresel bozulmaya neden olduğuna dair kanıtlar elde etmişlerdir. Sunulan olumsuz kanıtlar, nükleer enerjiden kaynaklanan kirlilik, radyoaktif maddelerin emisyonu, nükleer atık yönetimi, güvenli bir şekilde depolanmasının zor olmasından kaynaklanabilmektedir. Öte yandan, elde edilen olumsuz sonuçlar, nükleer enerjinin kurulum maliyetlerinin yüksek düzeyde olması, fosil ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha yüksek işletme maliyetlerine sahip olması gibi nedenlerle açıklanabilmektedir.

Öte yandan, MMQR tahmincisinden elde edilen bulgular, LRE ile LEF arasında kayda değer bir negatif korelasyon olduğunu göstermektedir. Gözlemlenen negatif ilişki, çeşitli yüzdelik dilimlerde farklı etkiler göstermektedir. LRE ve LEF arasındaki ilişkiyi incelendiğinde, LRE'deki %1'lik bir artışın, Q0.10'da %0,03, Q0.25'te %0,026, Q0.50'de %0,023, Q0.75'te %0,017 ve Q0.90'da %0,012'lik bir LEF azalışıyla ilişkili olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu sonuçlar, LRE'nin LEF'yi azaltarak çevre kalitesinin artmasına katkı sağladığını göstermektedir. Ayrıca bulgular, düşük kantillerden yüksek kantillere doğru gidildikçe LRE'nin LEF üzerindeki etkisinin azaldığını ve en yüksek kantil olan Q0.90'da istatistiksel olarak anlamlılık kazanmadığını ortaya koymaktadır. Bu sonuç, yüksek ekolojik baskı altında olan bu ülkelerde yenilenebilir enerji tüketiminin artış göstermesi ekolojik ayak izi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Bu, analize dahil edilen ülkelerde ekolojik ayak izinin son yıllarda biyolojik kapasiteyi aştığını ve ekolojik ayak izini azaltmak için yenilenebilir enerjinin artışının tek başına bu durumu sağlayamadığını düşündürmektedir. Yenilenebilir LRE'nin LEF üzerindeki genel olarak olumlu etkisine yönelik bulgular, Wang vd. (2024) tarafından yürütülen araştırmada belirtildiği gibi, LRE kullanımının karbon kirliliğini azaltırken aynı zamanda gezegenimiz üzerindeki çevresel etkiyi önemli ölçüde azaltan uygulanabilir bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. LRE'nin ekolojik ayak izini azaltarak çevre kalitesini arttırdığına yönelik elde edilen bulgular, daha önceki araştırmalardan (Al Numan vd., 2025; Duran vd., 2023; Hakkak vd., 2023; Oprea vd., 2025; Özbek ve Naimoğlu, 2025; Yurtkuran vd., 2025) elde edilen sonuçlarla da örtüşmektedir.

Aynı zamanda, ekonomik büyüme (LGDP), tüm kantillerde LEF üzerinde tutarlı bir şekilde pozitif bir etki göstermektedir, ancak kantiller arttıkça büyüklükte hafif bir düşüş gözlenmektedir. Katsayı, Q0.10'da 2,34'ten başlayıp Q0.90'da 1,75'e düşmektedir; bu da ekonomik genişlemenin daha yüksek çevre kirliliğini tetiklemeye devam etmesine rağmen, etkisinin daha düşük kirlilik seviyelerinde nispeten daha güçlü olduğunu ve kirlilik arttıkça hafifçe azaldığını göstermektedir. Bu bulgu, ekolojik ayak izinin başlangıçta ekonomik büyüme ile arttığını ancak belirli bir gelir eşliğinin ötesinde istikrar kazanabileceğini veya azalabileceğini öne süren EKC hipoteziyle uyumludur. Ekonomik büyümenin ekolojik ayak izi üzerindeki önemli etkisi, ekonomik genişlemeyi çevresel sürdürülebilirlikle dengeleme zorluğunun altını çizmekte ve daha yeşil büyüme stratejilerine geçişi gerektirmektedir. Öte yandan karesi alınmış terim $LGDP^2$, dağılım boyunca negatif bir ilişki göstermekte olup, bütün kantillerde %1 düzeyinde istatistiksel olarak anlamlılık kazanmaktadır. $LGDP$ 'nin pozitif katsayısı ve $LGDP^2$ 'nin negatif katsayısı, EKC hipotezinin örneklem ülkelerde geçerli olduğunu göstermektedir. Bulgular, ekonomik büyüme ve ekolojik ayak izi arasında olası bir ters U ilişkisini öne sürmekte ve düşük gelir büyümesi ekolojik baskıyı kötüleştirirken, orta düzey büyüme geçici bir rahatlama sağlamakta ve yüksek gelir etkiyi azaltmaktadır (Georgescu ve Kinnunen, 2025). Nükleer enerji tüketimi gerçekleştiren 25 ülke için elde edilen EKC hipotezinin geçerliliği daha önce gerçekleştirilen birçok çalışmadan (Bello vd., 2024; Miyan vd., 2026; Ozatac vd., 2017; Saqib vd., 2023; Yang vd., 2022; Yurtkuran vd., 2025) elde edilen bulgular ile aynıdır. Son olarak, EKC eğrisinin dönüm noktası ise $(-\phi_3/2\phi_4)$ olarak hesaplanmış ve sonuçlar Q0.10 kantilde 10,796, Q0.25'te 10,92, Q0.50'de 11.57, Q0.75'te 11.30 ve son olarak Q0.90'da ise 11,58 olarak gerçekleşmiştir. Bulgular, analize dahil edilen 25 ülkede dönüm noktalarına kadar ekolojik ayak izinin artacağını, dönüm noktalarında maksimuma ulaşacağını ve sonrasında ise ekolojik ayak izinin azalacağını ifade etmektedir.

DYY açısından MMQR sonuçları, bütün kantillerde DYY'nin LEF üzerinde küçük ama pozitif bir etkisinin olduğunu göstermektedir. DYY'nin ekolojik ayak izi üzerindeki bu olumsuz etkisi düşük kantillerden yüksek kantillere doğru artmaktadır. DYY'deki %1'lik bir artışın LEF'yi %0,0018 ile %0,003 arasında artırdığını göstermektedir; bu da DYY girişlerinin daha yüksek ekolojik ayak izine yol açabileceğini, örneklem ülkelerde kirlilik cenneti hipotezini desteklemekte ve bazı sermaye girişlerinin daha temiz teknolojiler tamamen benimsenmeden önce başlangıçta enerji yoğun faaliyetleri teşvik edebileceğini öne sürmektedir (Mohamad ve Shaari, 2025). Bir diğer ifadeyle, bazı gelen sermaye akışlarının hala emisyon yoğun endüstrilere yönlendirilebileceğini göstermektedir. Kirlilik cenneti hipotezinin geçerliliğe ait elde edilen bu sonuç, Al Numan vd. (2025) tarafından dokuz Güney Doğu Asya Ülkeleri Birliği (ASEAN) ülkeleri, Padhan ve Bhat (2024) tarafından BRICS ve gelecek 11 ülkeleri, Hassen vd. (2025) tarafından Etiyopya, Mohamad ve Shaari (2025) tarafından Japonya ve Özsalman vd. (2025) tarafından kırılğan beşli ülkeleri için gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen bulgular ile benzerlik göstermektedir.

Şekil 2. Sonuçların Özeti



Kaynak: Yazar tarafından üretilmiştir.

4.6. Panel Nedensellik Testi Sonuçları

Tablo 9, Dumitrescu-Hurlin panel nedensellik analizinden elde edilen sonuçları sunmaktadır. LEF ile LNE, LRE, LGDP, LGDP² ve DYY arasındaki ilişki incelenmiştir. Bulgular, LEF'den DYY'ye doğru tek yönlü bir nedenselliğin olduğunu gösterirken, LEF ile LNE, LRE ve LGDP ve LGDP² arasında ise çift yönlü nedenselliğin varlığını ortaya koymaktadır. Ekolojik ayak izinde meydana gelecek bir etki nükleer enerji, yenilenebilir enerji ve ekonomik büyümeyi etkilerken, aynı şekilde nükleer enerjinin, yenilenebilir enerjinin ve ekonomik büyümenin ekolojik ayak izini yönlendirdiğini göstermektedir. Başka bir deyişle, çift yönlü nedenselliğe sahip değişkenlerin her ikisi de birbirleri için tahmin gücüne sahiptir; çünkü LNE, LRE, LGDP ve LGDP²'nin mevcut değerleri, LEF'in gelecek değerlerini tahmin etmek için kullanılabilir ve bunun tersi de geçerli olabilmektedir. Bu sonuçların da çevresel koşulları iyileştirmeyi amaçlayan herhangi bir plan veya stratejide dikkate alınmaları gerektiği anlamına gelmektedir.

Tablo 9. Dumitrescu-Hurlin (2012) Sonuçları

Sıfır Hipotez	W-bar	Z-bar	Olasılık	Sonuç
LNE ≠ > LEF	4,6093***	6,5232	0,0000	Çift yönlü nedensellik
LEF ≠ > LNE	4,4044***	6,0110	0,0000	
LRE ≠ > LEF	3,9315***	4,8287	0,0000	
LEF ≠ > LRE	4,0733***	5,1833	0,0000	Çift yönlü nedensellik
LGDP ≠ > LEF	5,3457***	8,3643	0,0000	
LEF ≠ > LGDP	4,6574***	6,6434	0,0000	
LGDP ² ≠ > LEF	5,3075***	8,2688	0,0000	Çift yönlü nedensellik
LEF ≠ > LGDP ²	4,7026***	6,7564	0,0000	
DYY ≠ > LEF	1,3772	-1,5570	0,1195	
LEF ≠ > DYY	3,3277***	3,3193	0,0009	Tek yönlü nedensellik

5. Sonuç

Bu çalışma, 2000-2023 dönemi için nükleer enerji tüketimi, yenilenebilir enerji kullanımı, ekonomik büyüme ve doğrudan yabancı yatırımların ekolojik ayak izi üzerindeki etkilerini inceleyerek nükleer enerji tüketimi gerçekleştiren 25 ülke bağlamında EKC ve kirlilik cenneti hipotezlerini araştırmaktadır. MMQR yaklaşımını kullanan analiz, doğrusal ve asimetrik doğrusal olmayan dinamikleri yakalayarak, ekonomik faaliyetlerin çevresel etkilerine dair kapsamlı bir anlayış sunmaktadır.

Bulgular, nükleer enerji kullanımının ekolojik ayak izini arttırdığını göstermektedir. Nükleer enerjinin fosil yakıtlara göre düşük CO₂ emisyonlarına sahip bir alternatif enerji kaynağı olarak değerlendirilmesine rağmen analize dahil edilen 25 ülkede ekolojik ayak izini arttırıcı etkisi bu enerji kaynağının üretiminden ve tüketiminden kaynaklanan kirlilik, radyoaktif maddelerin çevreye yaydığı emisyon miktarı, nükleer atık yönetiminin yeterince çevresel sürdürülebilirliğe yönelik gerçekleştirilmesinin mümkün olamamasından kaynaklanabilmektedir. Bununla birlikte, nükleer enerjinin olası kazalarından kaynaklı meydana gelebilecek çevresel bozulmaların artması, kurulum maliyetlerinin yüksek olması ve Hindistan, Çin gibi ülkelerde hala fosil yakıtların daha fazla önemli olması nükleer enerjinin ekolojik ayak izini arttırıcı etkileri arasında yer almaktadır. Buna rağmen bulgular, yenilenebilir enerji kullanımının ekolojik ayak izini azaltarak çevresel kalitenin artmasına katkı sağladığını göstermektedir. Bu sonuç; güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal gibi nükleer enerjiye göre daha çevreci enerji kaynaklarının ekolojik ayak izini azaltarak bu ülkelerde fosil ve nükleer enerjiye olan bağımlılığı azalttığını ve doğal kaynaklar üzerindeki baskıyı azalttığını göstermektedir. Bu bulgu, yenilenebilir enerjinin ekolojik ayak izini azaltıcı, nükleer enerjinin ise ekolojik ayak izini arttırıcı etkisini desteklemektedir.

Önemli olarak, bulgular nükleer enerji tüketimine sahip ülkeler için EKC hipotezini doğrulamakta ve kişi başına düşen GSYİH'nin başlangıçta ekolojik ayak izini arttırdığını, ancak belirli bir gelir eşliğinin ötesinde, daha fazla büyümenin ekolojik ayak izinde düşüşe yol açtığını göstermektedir. Bu bulgular, ülkelerin hizmet odaklı, enerji verimli bir ekonomiye geçişini yansıtmakta ve gelişmiş ekonomilerin ekonomik genişlemeyi çevresel zarardan ayırabileceğine dair teorik beklentiyi doğrulamaktadır.

Son olarak bulgular, nükleer enerji tüketimine sahip 25 ülkede doğrudan yabancı yatırımların ekolojik ayak izini arttırdığını, bazı gelen sermaye akışlarının hala emisyon yoğun endüstrilere yönlendirildiğini ve kirlilik cenneti hipotezinin geçerli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu, çevresel düzenlemelerin zayıf olduğu Çin, Hindistan, Pakistan, Güney Afrika gibi ülkeler için önemli bir risk unsuru oluşturmaktadır.

5.1. Politika Önerileri

Elde edilen bulgular doğrultusunda politika yapıcılara şu önerilerde bulunmaktadır: İlk olarak, hükümetler, nükleer ve yenilenebilir enerji yatırımları gerçekleştirirken sağlayacağı finansman kaynaklarını çok iyi bir şekilde paylaşmalı, yenilenebilir enerjiye ayrılan payın nükleere ayrılan paydan fazla olmasına dikkat etmelidir. Nükleer enerjiye ayrılan finansmanı da daha güvenli reaktör tasarımlarının geliştirilmesi ve uzun vadeli atık yönetimi çözümlerini güvence altına almak için önceliklendirmelidir. Yeni gerçekleştirilecek nükleer yatırımlardan önce bu reaktörlerin çevreye olası etkileri daha ayrıntılı olarak değerlendirilmelidir. İkinci olarak hükümetler ve politika yapıcılar, yenilenebilir enerji kaynaklarının ekolojik ayak izini azaltıcı etkisini dikkate alarak güneş, rüzgâr enerjileri gibi düşük karbonlu teknolojilere, temiz enerji üretimine veya yeşil altyapıya katkıda bulunan uluslararası ve ulusal yatırımcılara vergi indirimleri, tercihli finansman ve inovasyon sübvansiyonları sunmalıdır. Fosil ve nükleer enerjiden yenilenebilir enerji kaynaklarına dönüşüm stratejileri belirlenmeli ve uzun vadeli olarak planlamalar gerçekleştirilmelidir. Üçüncü olarak, politika yapıcılar ekonomik büyümeyi sürdürülebilirlikle dengelemeyi amaçlamalı, yeşil büyüme politikaları belirleyerek emisyon eğilimlerindeki önemli dönüm noktalarını öngörmek için EKC projeksiyonlarını ulusal iklim ve endüstriyel planlamaya dahil etmelidir. Sürdürülebilir ekonomik büyüme için enerji verimliliğini arttırmaya yönelik stratejiler belirlenmeli, yoğun karbon salınımı yaratan üretim faaliyetlerinden vazgeçilmelidir. Bunu da gerçekleştirirken temiz teknolojilere yönelik araştırma-geliştirme (Ar-Ge) yatırımlarını destekleyici politikalar oluşturmalıdırlar. Böylece 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşma yolunda önemli bir yol alınmış olacaktır. Son olarak, DYY'nin ekolojik ayak izini arttırıcı etkisi dikkate alınmalı, çevreyi kirlüten faaliyetler gerçekleştiren firmalara, sektörlere ağır yaptırımlar (para cezası, kapatma vb.) uygulanmalı, ekolojik ayak izini azaltacak üretim gerçekleştiren firmalara da teşvikler sağlanmalıdır.

5.2. Çalışmanın Sınırlılıkları ve Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Çalışmanın diğer çalışmalar gibi belirli kısıtlamaları da bulunmaktadır. Bu çalışma, EKC hipotezine teorik önemleri ve çalışmanın enerji politikası ve sermaye akışlarına verdiği önem nedeniyle, özellikle kişi başına gelir, nükleer enerji, yenilenebilir enerji kullanımı ve doğrudan yabancı yatırım gibi sınırlı sayıda

açıklayıcı değişkene odaklanmaktadır. Ancak, ticaret açıklığı, küreselleşme, kentleşme, nüfus ve kurumsal kalite gibi yaygın olarak tartışılan diğer faktörler modele dahil edilmemiştir. Bu değişkenlerin dışlanması, ekolojik ayak izinin karmaşık ve çok boyutlu doğasını tam olarak yakalama yeteneğini sınırlayabilmekte ve gözlemlenen ilişkilerin gücünü veya yönünü etkileyebilmektedir. İkinci olarak bu çalışma ekolojik ayak izi değişkenini dikkate almakta, buna rağmen çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinden olan ve son zamanlarda sıklıkla kullanılan yük kapasite faktörünü dikkate almamaktadır. Gelecekteki araştırmalar, daha fazla ülke ve yıl dikkate alınarak gerçekleştirilebilir, yapısal kırılma testleri uygulanabilir ve modele ek çevresel ve kurumsal değişkenler eklenerek genişletilebilir. Ülke bazlı sonuçlar dikkate alınarak genellemeden kaçınılabilir ve ülkelere özgü politika önerilerinde bulunulabilir. Benzer nükleer, yenilenebilir ve yatırım profillerine sahip diğer gelişmiş ekonomilerle karşılaştırmalı analizler yapılarak karbon nötrlüğüne yönelik sürdürülebilir yolların anlaşılması daha da zenginleştirilebilir.

Beyan ve Açıklamalar (Declarations and Disclosures)

Yazarların Etik Sorumlulukları (Ethical Responsibilities of Authors): Bu çalışmanın yazarı, araştırma ve yayın etiği ilkelerine uyduğunu kabul etmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflicts of Interest): Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Finansal Destek (Funding): Yazar, çalışmanın hazırlanması ve/veya yayınlanması sürecinde herhangi bir finansal destek almamıştır.

Yazar Katkı Oranı (Author Contributions): Yazar; kavramlaştırma ve çalışma dizaynı, verilerin toplanması, verilerin analizi ve sonuçların yorumlanması, çalışmanın ilk/taslak halinin yazılması, çalışmanın gözden geçirilmesi ve düzenlenmesi/düzeltilmesi aşamalarından tek başına sorumlu olduğunu beyan etmektedir.

İntihal Denetimi (Plagiarism Checking): Bu çalışma, intihal tarama programı kullanılarak intihal taramasından geçirilmiştir.

Kaynaklar

- Abid, M., Gheraia, Z., & Abdelli, H. (2022). Does renewable energy consumption affect ecological footprints in Saudi Arabia? A bootstrap causality test. *Renewable Energy*, 189, 813-821. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.043>
- Ahmed, N., Mahboob, F., Hamid, Z., Sheikh, A. A., Ali, M. S. E., Glabiszewski, W., ... & Cyfert, S. (2022). Nexus between nuclear energy consumption and carbon footprint in Asia Pacific region: Policy toward environmental sustainability. *Energies*, 15(19), 6956. <https://doi.org/10.3390/en15196956>
- Al Numan, A., Tahrim, F., Esquivias, M. A., Biswas, M. K., & Pramanthi, M. R. (2025). Testing the pollution haven and inverted n-shaped EKC hypotheses in the ASEAN region: The impact of FDI and energy mix on environmental quality. *Environmental and Sustainability Indicators*, 100698. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100698>
- Ali, M., Soomro, S. A., Bakari, H., Samour, A., & Tursoy, T. (2025). Does nuclear energy consumption contribute to load capacity factor? Modeling the effects of public debt and financial development in France. *Nuclear Engineering and Technology*, 57(6), 103414. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.103414>
- Aslan, A., Ocal, O., & Özsolak, B. (2022). Testing the EKC hypothesis for the USA by avoiding aggregation bias: a microstudy by subsectors. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(27), 41684-41694. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18897-6>
- Avrupa Komisyonu. (2025). https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2025)
- Ayad, H., Bendahmane, A., & Dahmani, M. D. (2025). Unveiling new perspectives on the role of remittances on the environmental quality in MENA Region: New evidence using MMQR approach. *Social Indicators Research*, 179(3), 1295-1327
- Balli, E., Sigeze, C., Ugur, M. S., & Çatık, A. N. (2023). The relationship between FDI, CO2 emissions, and energy consumption in Asia-Pacific economic cooperation countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 42845-42862. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17494-3>

- Baltagi, B. H., Feng, Q., & Kao, C. (2012). A Lagrange Multiplier test for cross-sectional dependence in a fixed effects panel data model. *Journal of Econometrics*, 170(1), 164-177. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2012.04.004>
- Bandyopadhyay, A., Rej, S., Villanthenkodath, M. A., & Mahalik, M. K. (2022). The role of nuclear energy consumption in abatement of ecological footprint: Novel insights from quantile-on-quantile regression. *Journal of Cleaner Production*, 358, 132052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132052>
- Barak, D., Kocoglu, M., Jahanger, A., & Tan, M. (2024). Testing the EKC hypothesis for ecological and carbon intensity of well-being: The role of forest extent. *Science of the Total Environment*, 945, 173794. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173794>
- Bekun, F. V., Gyamfi, B. A., Etokakpan, M. U., & Çakir, B. (2023). Revisiting the pollution haven hypothesis within the context of the environmental Kuznets curve. *International Journal of Energy Sector Management*, 17(6), 1210-1231. <https://doi.org/10.1108/ijesm-12-2020-0013>
- Bello, M. O., Jimoh, S. O., Ch'ng, K. S., & Oyerinola, D. S. (2024). Environmental sustainability in ASEAN: what roles do energy consumption, economic growth, and foreign direct investment play? *Environment, Development and Sustainability*, 1-27. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05250-9>
- Breusch, T. S., & Pagan, A. R. (1980). The Lagrange multiplier test and its applications to model specification in econometrics. *The Review of Economic Studies*, 47(1), 239-253. <https://doi.org/10.2307/2297111>
- Bulut, U., Ucler, G., & Inglesi-Lotz, R. (2021). Does the pollution haven hypothesis prevail in Turkey? Empirical evidence from nonlinear smooth transition models. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(29), 38563-38572. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13476-7>
- Cameron, S. (1994). A review of the econometric evidence on the effects of capital punishment. *The Journal of Socio-Economics*, 23(1-2), 197-214. [https://doi.org/10.1016/1053-5357\(94\)90027-2](https://doi.org/10.1016/1053-5357(94)90027-2)
- Chiriluş, A., & Costea, A. (2023). The effect of FDI on environmental degradation in Romania: Testing the pollution haven hypothesis. *Sustainability*, 15(13), 10733. <https://doi.org/10.3390/su151310733>
- Chishti, M. Z. (2023). Exploring the dynamic link between FDI, remittances, and ecological footprint in Pakistan: Evidence from partial and multiple wavelet based-analysis. *Research in Globalization*, 6, 100109. <https://doi.org/10.1016/j.resglo.2022.100109>
- Dai, J., Ahmed, Z., Alvarado, R., & Ahmad, M. (2024). Assessing the nexus between human capital, green energy, and load capacity factor: policymaking for achieving sustainable development goals. *Gondwana Research*, 129, 452-464. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.04.009>
- DiMaria, C. H. (2019). An indicator for the economic performance and ecological sustainability of nations. *Environmental Modeling & Assessment*, 24(3), 279-294. <https://doi.org/10.1007/s10666-018-9626-2>
- Dong, K., Sun, R., Jiang, H., & Zeng, X. (2018). CO2 emissions, economic growth, and the environmental Kuznets curve in China: What roles can nuclear energy and renewable energy play? *Journal of Cleaner Production*, 196, 51-63. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.271>
- Dumitrescu, E. I., & Hurlin, C. (2012). Testing for Granger non-causality in heterogeneous panels. *Economic Modelling*, 29(4), 1450-1460. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2012.02.014>
- Duran, I. A., Saqib, N., & Mahmood, H. (2023). Assessing the connection between nuclear and renewable energy on ecological footprint within the EKC framework: Implications for sustainable policy in leading nuclear energy-producing countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 13(2), 256-264. <https://doi.org/10.32479/ijeeep.14183>
- Durmus, S., Agirkaya, M. B., & Akyol, H. (2025). Drivers of the load capacity factor in new industrialized countries: Economic growth, financial development and urbanization on load capacity factor. *International Journal of Economics and Financial Issues*, 15(3), 184. <https://doi.org/10.32479/ijefi.18988>
- Dünya Bankası. (2025). *Dünya kalkınma göstergeleri*. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators> (Erişim Tarihi: 3 Eylül 2025).
- Dünya Nükleer Birliği (2025). <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-archive/reactor-archive-december-2024> (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2025).
- Georgescu, I., & Kinnunen, J. (2025). Nonlinear effects of GDP regimes, renewable energy, and urbanization on Finland's ecological footprint: An MT-NARDL approach. *World Development Sustainability*, 100235. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2025.100235>
- Global Footprint Network. (2025). <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint> (Erişim Tarihi: 10 Ağustos 2025).

- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991) *Environmental impacts of a North American free trade agreement*. National Bureau of Economic Research (No. w3914). <https://doi.org/10.3386/w3914>
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377. <https://doi.org/10.2307/2118443>
- Hakkak, M., Altıntaş, N., & Hakkak, S. (2023). Exploring the relationship between nuclear and renewable energy usage, ecological footprint, and load capacity factor: A study of the Russian Federation testing the EKC and LCC hypothesis. *Renewable Energy Focus*, 46, 356-366. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.07.005>
- Hassan, S. T., Batool, B., Wang, P., Zhu, B., & Sadiq, M. (2023). Impact of economic complexity index, globalization, and nuclear energy consumption on ecological footprint: first insights in OECD context. *Energy*, 263, 125628. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125628>
- Hassen, S., Fentaw, A., & Tadesse, T. (2025). Determinants of environmental quality in Ethiopia: testing the validity of the environmental Kuznets curve and pollution haven hypothesis from 1981-2020. *International Journal of Green Economics*, 19(1), 44-64. <https://doi.org/10.1504/ijge.2025.10071333>
- Holtbrügge, D., & Raghavan, N. (2025). Environmental effects of foreign direct investment in India: pollution haven or pollution halo? *Critical Perspectives on International Business*, 21(3), 417-442. <https://doi.org/10.1108/cpoib-06-2024-0064>
- Hu, H., Xie, N., Fang, D., & Zhang, X. (2018). The role of renewable energy consumption and commercial services trade in carbon dioxide reduction: Evidence from 25 developing countries. *Applied Energy*, 211, 1229-1244. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.019>
- Huilan, W., Akadiri, S. S., Haouas, I., Awosusi, A. A., & Odu, A. T. (2024). Impact of trade liberalization and renewable energy on load capacity factor: Evidence from novel dual adjustment approach. *Energy & Environment*, 35(2), 795-814. <https://doi.org/10.1177/0958305x221137559>
- IPCC, (2022). Climate change: impacts, adaptation and vulnerability, IPCC Geneva, Switzerland. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (Erişim tarihi 10 Ağustos 2025).
- Javed, A., Usman, M., & Rapposelli, A. (2025). Transition toward a sustainable future: Exploring the role of green investment, environmental policy, and financial development in the context of load capacity factor in G-7 countries. *Sustainable Development*, 33(2), 1589-1609. <https://doi.org/10.1002/sd.3192>
- Kartal, M. T. (2022). The role of consumption of energy, fossil sources, nuclear energy, and renewable energy on environmental degradation in top-five carbon producing countries. *Renewable Energy*, 184, 871-880. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.022>
- Khalid, K., Usman, M., & Mehdi, M. A. (2021). The determinants of environmental quality in the SAARC region: A spatial heterogeneous panel data approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(6), 6422-6436. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10896-9>
- Khan, M. A., & Ozturk, I. (2020). Examining foreign direct investment and environmental pollution linkage in Asia. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(7), 7244-7255. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07387-x>
- Khoshnevis Yazdi, S., & Shakouri, B. (2018). The renewable energy, CO2 emissions, and economic growth: VAR model. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 13(1), 53-59. <https://doi.org/10.1080/15567249.2017.1403499>
- Knapp, V., & Pevec, D. (2018). Promises and limitations of nuclear fission energy in combating climate change. *Energy Policy*, 120, 94-99. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.05.027>
- Lau, L. S., Choong, C. K., Ng, C. F., Liew, F. M., & Ching, S. L. (2019). Is nuclear energy clean? Revisit of Environmental Kuznets Curve hypothesis in OECD countries. *Economic Modelling*, 77, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2018.09.015>
- Liu, C., Niu, H., Hayyat, M., & Hao, V. (2025). Understanding the relationship between ecological footprints and renewable energy in BRICS nations: An economic perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, 118, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.141>
- Machado, J. A., & Silva, J. S. (2019). Quantiles via moments. *Journal of Econometrics*, 213(1), 145-173. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2019.04.009>
- Magazzino, C. (2024). Ecological footprint, electricity consumption, and economic growth in China: geopolitical risk and natural resources governance. *Empirical Economics*, 66(1), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s00181-023-02460-4>

- Mahmood, N., Wang, Z., & Zhang, B. (2020). The role of nuclear energy in the correction of environmental pollution: Evidence from Pakistan. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(6), 1327-1333. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.11.027>
- Massagony, A., & Budiono. (2023). Is the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis valid on CO2 emissions in Indonesia? *International Journal of Environmental Studies*, 80(1), 20-31. <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2029097>
- Mehboob, M. Y., Ma, B., Sadiq, M., & Mehboob, M. B. (2024). How do nuclear energy consumption, environmental taxes, and trade globalization impact ecological footprints? Novel policy insight from nuclear power countries. *Energy*, 313, 133661. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133661>
- Menyah, K., & Wolde-Rufael, Y. (2010). CO2 emissions, nuclear energy, renewable energy and economic growth in the US. *Energy Policy*, 38(6), 2911-2915. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.024>
- Mert, M., & Caglar, A. E. (2020). Testing pollution haven and pollution halo hypotheses for Turkey: A new perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(26), 32933-32943. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09469-7>
- Miyan, Md. S., Cheong, C. W. H., Sharif, A., & Afshan, S. (2026). Green finance, innovation, and environment: Testing the EKC in ASEAN-4 with MMQR approach. *Global Transitions*, 8(1), 74-88. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2025.09.001>
- Mohamad, A. H. H., & Shaari, M. S. (2025). The environmental Kuznets curve in Japan with nuclear energy and foreign direct investment using ARDL and NARDL models. *Discover Environment*, 3(1), 300. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00511-4>
- Murshed, M., Mahmood, H., Alkhateeb, T. T. Y., & Bassim, M. (2020). The impacts of energy consumption, energy prices and energy import-dependency on gross and sectoral value-added in Sri Lanka. *Energies*, 13(24), 6565. <https://doi.org/10.3390/en13246565>
- Naqvi, S. A. A., Hussain, M., Hussain, B., Shah, S. A. R., Nazir, J., & Usman, M. (2023). Environmental sustainability and biomass energy consumption through the lens of pollution Haven hypothesis and renewable energy-environmental kuznets curve. *Renewable Energy*, 212, 621-631. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.127>
- Nathaniel, S. P., Yalçiner, K., & Bekun, F. V. (2021). Assessing the environmental sustainability corridor: Linking natural resources, renewable energy, human capital, and ecological footprint in BRICS. *Resources Policy*, 70, 101924. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101924>
- Nuriddinova, M., & Ahmad, M. (2025). Economic growth with environmental hurdles in Uzbekistan: testing the EKC hypothesis. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1589766. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1589766>
- Ohajionu, U. C., Gyamfi, B. A., Haseki, M. I., & Bekun, F. V. (2022). Assessing the linkage between energy consumption, financial development, tourism and environment: evidence from method of moments quantile regression. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(20), 30004-30018. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17920-6>
- Oprea, S. V., Bâra, A., & Georgescu, I. A. (2025). Assessing the dynamics of ecological footprint in relation to economic and energy factors: a comparative analysis of Finland and Japan. *Journal of the Knowledge Economy*, 16(3), 11162-11197. <https://doi.org/10.1007/s13132-024-02312-1>
- Our World in Data (2025). <https://ourworldindata.org/> (Erişim Tarihi: 3 Eylül 2025).
- Ozatac, N., Gokmenoglu, K. K., & Taspinar, N. (2017). Testing the EKC hypothesis by considering trade openness, urbanization, and financial development: The case of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(20), 16690-16701. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9317-6>
- Özbek, S., & Naimoğlu, M. (2025). The effectiveness of renewable energy technology under the EKC hypothesis and the impact of fossil and nuclear energy investments on the UK's ecological footprint. *Energy*, 322, 135351. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135351>
- Özsalman, E., Derindağ, Ö. F., & Bayat, T. (2025). Pollution haven, pollution halo, or pollution hell? The impact of foreign direct investment on CO2 emission and temperature rise in fragile five countries. *Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi (AKAD)*, 17(32), 134-149. <https://doi.org/10.20990/kilisibfakademik.1634138>
- Padhan, L., & Bhat, S. (2024). Nexus between foreign direct investment and ecological footprint in BRICS and Next-11: The moderating role of green innovation. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 35(4), 799-817. <https://doi.org/10.1108/meq-07-2023-0204>

- Pata, U. K., & Caglar, A. E. (2021). Investigating the EKC hypothesis with renewable energy consumption, human capital, globalization and trade openness for China: Evidence from augmented ARDL approach with a structural break. *Energy*, 216, 119220. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119220>
- Pata, U. K., & Samour, A. (2022). Do renewable and nuclear energy enhance environmental quality in France? A new EKC approach with the load capacity factor. *Progress in Nuclear Energy*, 149, 104249. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104249>
- Pata, U. K., Kartal, M. T., Dam, M. M., & Kaya, F. (2023). Navigating the impact of renewable energy, trade openness, income, and globalization on load capacity factor: the case of Latin American and Caribbean (LAC) countries. *International Journal of Energy Research*, 2023(1), 6828781. <https://doi.org/10.1155/2023/6828781>
- Pesaran, M. H. (2004). General diagnostic tests for cross section dependence in panels. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.572504>
- Pesaran, M. H., & Yamagata, T. (2008). Testing slope homogeneity in large panels. *Journal of Econometrics*, 142(1), 50-93. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2007.05.010>
- Pilatin, A., Barut, A., Hernández Soto, G., & Ullah, S. (2025). Foreign direct investment and growth impact on pollution in the EU countries: Empirical analysis of the EKC and pollution halo hypothesis. *Available at SSRN 5174310*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5174309>
- Poinssot, C., Bourg, S., & Boullis, B. (2016). Improving the nuclear energy sustainability by decreasing its environmental footprint. Guidelines from life cycle assessment simulations. *Progress in Nuclear Energy*, 92, 234-241. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.10.012>
- Prempeh, K. B., Kyeremeh, C., Danso, F. K., & Yeboah, S. A. (2024). Exploring the impact of financial development on renewable energy consumption within the renewable energy-environmental Kuznets curve framework in Sub-Saharan Africa. *International Journal of Renewable Energy Development*, 13(5), 884-897. <https://doi.org/10.61435/ijred.2024.60339>
- Rani, T., Wang, F., Rauf, F., Ain, Q. U., & Ali, H. (2023). Linking personal remittance and fossil fuels energy consumption to environmental degradation: Evidence from all SAARC countries. *Environment, Development and Sustainability*, 25(8), 8447-8468. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02407-2>
- Sadekin, M. N. (2025). Analyzing the impact of remittance and electricity consumption on ecological footprint in South Asia: the role of globalization using panel ARDL and MMQR method. *Discover Sustainability*, 6(1), 301. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01087-y>
- Sadiq, M., & Wen, F. (2022). Environmental footprint impacts of nuclear energy consumption: The role of environmental technology and globalization in ten largest ecological footprint countries. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(10), 3672-3681. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.05.016>
- Saidi, K., & Omri, A. (2020). Reducing CO2 emissions in OECD countries: do renewable and nuclear energy matter? *Progress in Nuclear Energy*, 126, 103425. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103425>
- Saif, S., Wang, Y., Iqbal, S., Amin, N., & Mushtaque, I. (2025). Paradox of achieving sustainable development goals by 2030 in gulf cooperation council: Differential effects of technological innovation, renewable energy and bio-capacity on carbon emission. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-03118-0>
- Saqib, N., Duran, I. A., & Ozturk, I. (2023). Unraveling the interrelationship of digitalization, renewable energy, and ecological footprints within the EKC framework: Empirical insights from the United States. *Sustainability*, 15(13), 10663. <https://doi.org/10.3390/su151310663>
- Saqib, N., Ozturk, I., Usman, M., Sharif, A., & Razzaq, A. (2023). Pollution haven or halo? How European countries leverage FDI, energy, and human capital to alleviate their ecological footprint. *Gondwana Research*, 116, 136-148. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.12.018>
- Sarkodie, S. A., & Adams, S. (2018). Renewable energy, nuclear energy, and environmental pollution: accounting for political institutional quality in South Africa. *Science of the total environment*, 643, 1590-1601. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.320>
- Tekin, B., Shahbaz, M. (2025). Assessing the impacts of financial development and agriculture, fisheries, and forestry value added on the ecological footprint of BRICS-T nations. *Clean Technology Environmental Policy*, 27, 7277-7296. <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03247-0>
- Toth, F. L., & Rogner, H. H. (2006). Oil and nuclear power: Past, present, and future. *Energy Economics*, 28(1), 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2005.03.004>

- Ullah, S., & Lin, B. (2024). Green energy dynamics: Analyzing the environmental impacts of renewable, hydro, and nuclear energy consumption in Pakistan. *Renewable Energy*, 232, 121025. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121025>
- Umair, M., Yousuf, M. U., Ul-Haq, J., Hussain, Z., & Visas, H. (2023). Revisiting the environmental impact of renewable energy, non-renewable energy, remittances, and economic growth: CO2 emissions versus ecological footprint for top remittance-receiving countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(23), 63565-63579. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26812-w>
- Usman, A., Ozturk, I., Naqvi, S. M. M. A., Ullah, S., & Javed, M. I. (2022). Revealing the nexus between nuclear energy and ecological footprint in STIRPAT model of advanced economies: Fresh evidence from novel CS-ARDL model. *Progress in Nuclear Energy*, 148, 104220. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104220>
- Wang, Q., Ge, Y., & Li, R. (2025). Does improving economic efficiency reduce ecological footprint? The role of financial development, renewable energy, and industrialization. *Energy & Environment*, 36(2), 729-755. <https://doi.org/10.1177/0958305x231183914>
- Wang, Y., Guan, W., Liu, L., & Ma, X. (2022). Biomass energy consumption and carbon neutrality in OECD countries: Testing pollution haven hypothesis and environmental Kuznets curve. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 975481. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.975481>
- Westerlund, J. (2007). Testing for error correction in panel data. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 69(6), 709-748. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.2007.00477.x>
- Ximei, K., Javaid, M. Q., Shams, T., & Sibte-e-Ali, M. (2025). Information and communication technology, economic globalization, and environmental sustainability in APEC nations: Insights from LCC and EKC hypotheses testing. *Sustainable Development*, 33(1), 878-903. <https://doi.org/10.1002/sd.3163>
- Xu, D., Salem, S., Awosusi, A. A., Abdurakhmanova, G., Altuntaş, M., Oluwajana, D., ... & Ojekemi, O. (2022). Load capacity factor and financial globalization in Brazil: The role of renewable energy and urbanization. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 823185. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.823185>
- Xu, X., Yu, W., Zhao, X., & Xu, W. (2023). Reassessing the linkage between natural resources and economic growth in China: Delving into the impacts of national resource taxes, renewable energy, financial advancements, and provincial fiscal expenditures. *Resources Policy*, 86, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104293>
- Xu, Y., Wu, X., Adam, N. A., Sultan, M. S., & Sumaira, A. A. (2025). Decarbonizing growth: Nuclear energy, green investments, and CO₂ emissions in BRICS economies. *Annals of Nuclear Energy*, 224, 111746. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111746>
- Yang, Q., Huo, J., Saqib, N., & Mahmood, H. (2022). Modelling the effect of renewable energy and public-private partnership in testing EKC hypothesis: Evidence from methods moment of quantile regression. *Renewable Energy*, 192, 485-494. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.123>
- Yilanci, V., & Pata, U. K. (2020). Investigating the EKC hypothesis for China: The role of economic complexity on ecological footprint. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(26), 32683-32694. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09434-4>
- Yurtkuran, S., Ahlat, A., & Yıkıcı, A. (2025). The role of clean energy, energy security risk and financial development on LCF and EF: Testing the EKC and LCC hypothesis for USA. *Energy and Buildings*, 116279. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116279>
- Zafar, M. W., Saleem, M. M., Destek, M. A., & Caglar, A. E. (2022). The dynamic linkage between remittances, export diversification, education, renewable energy consumption, economic growth, and CO2 emissions in top remittance-receiving countries. *Sustainable Development*, 30(1), 165-175. <https://doi.org/10.1002/sd.2236>
- Zhang, L., Yang, B., & Jahanger, A. (2022). The role of remittance inflow and renewable and non-renewable energy consumption in the environment: Accounting ecological footprint indicator for top remittance-receiving countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(11), 15915-15930. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16545-z>

This Page Intentionally Left Blank