

Karbon Ayak İzini Azaltmada Temiz Enerji ve Enerji Ar-Ge Harcamalarının Rolü: Amerika Birleşik Devletleri için Simetrik ve Asimetrik Bulgular

Kumru Türköz¹

Özet

Çevresel iyileşmeyi ve sürdürülebilirliği sağlamak için enerji bileşiminde temiz enerji kaynaklarına doğru bir geçiş şarttır. Mevcut çalışma, nükleer ve yenilenebilir enerji kullanımında öncü ülke konumunda bulunan Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde nükleer enerji, yenilenebilir enerji ve enerji teknolojileri araştırma-geliştirme (ar-ge) harcamalarının ülkenin karbon ayak izi üzerindeki potansiyel etkilerini araştırmaktadır. 1974-2023 döneminin ele alındığı çalışmada, değişkenler arasındaki simetrik ve asimetrik etkileri birlikte dikkate almak amacıyla otoregresif dağıtılmış gecikme (Autoregressive Distributed Lag-ARDL) ve doğrusal olmayan otoregresif dağıtılmış gecikme (Non-linear Autoregressive Distributed Lag-NARDL) yaklaşımlarından faydalanılmaktadır. Ampirik bulgular, değişkenler arasında uzun dönemde simetrik ve asimetrik bir eşbütünleşme ilişkisi olduğuna işaret etmektedir. ARDL analizi bulguları, uzun dönemde nükleer enerjinin, yenilenebilir enerjinin ve enerji teknolojisi ar-ge harcamalarının karbon ayak izi üzerinde anlamlı ve negatif bir etki yarattığını göstermektedir. Değişkenlerdeki pozitif ve negatif şokları dikkate alan NARDL analizi bulguları ise, uzun dönemde enerji teknolojileri ar-ge harcamalarındaki pozitif şoklar hariç diğer bütün değişkenlerdeki pozitif ve negatif şokların karbon ayak izini azalttığına işaret etmektedir. Dolayısıyla bulgular, ülkede nükleer ve yenilenebilir enerji tüketiminin çevresel kaliteyi önemli ölçüde iyileştirdiğini ve yenilenebilir enerjinin nükleer enerjiye kıyasla karbon ayak izini azaltmada görece daha etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, ülkenin enerji politikası için önemli birtakım çıkarımlar sunmaktadır.

1 Doç. Dr., Balıkesir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü, İktisat Teorisi A.B.D. kumru.turkoz@balikesir.edu.tr ORCID: 0000-0002-0640-4212

1. Giriş

Enerji kaynaklarının kullanımı ekonomik büyüme için önemli bir faktör olmakla birlikte, çok yönlü çevresel olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir (Hassan, Baloch ve Tarar, 2020:2969; Nathaniel vd., 2021:47958). Özellikle kirli fosil yakıtların yakılmasıyla elde edilen enerjinin iki yönlü etkisi bulunmaktadır. Bunlardan ilki yerel, bölgesel ve küresel düzeyde ortaya çıkan çevresel bozulma; ikincisi ise dışa bağımlılık ve tedarik güvenliğidir (Goldemberg, 2006:2186). Bu nedenle enerji güvenliğinin ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması için daha temiz enerji kaynaklarının daha fazla tedarik edilmesi gerekmektedir (Murshed vd., 2022:664). Bu kapsamda, Paris Anlaşması gibi uluslararası çevre kalkınma anlaşmaları, kirli fosil yakıt kullanımlarından kaynaklanan emisyonları sınırlamayı amaçlamaktadır (United Nations, 2015). Ayrıca, Birleşmiş Milletlerin Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SDG) bildirelerinin yedinci ve on üçüncü hedeflerinde, iklim değişikliğiyle mücadele etmek ve dünya çapında sürdürülebilir ekonomik büyümeyi garanti altına almak için uygun fiyatlı, güvenilir ve temiz enerji kaynaklarına erişimi artırmak ve karbondioksit (CO₂) emisyonlarını azaltmak amaçlanmaktadır (United Nations, 2024). Sonuç olarak, dünya ekonomileri küresel enerji sistemleri içinde temiz enerji geçişlerine giden ilgili yolları keşfetmeye çalışmaktadır (Zhao vd., 2022:853).

Temiz enerji, karbon nötrlüğüne ulaşmak ve üretim süreçlerini çevresel sürdürülebilirliğe doğru taşımak için kullanılan enerji kaynaklarını temsil etmektedir. Bu kaynaklar enerjiye dönüştürüldüğünde karbondioksit yaymaz ve yüksek karbon içeriğine sahip enerji kaynaklarına temiz bir alternatiftir (Saqib, 2022: 60745; Xue vd., 2022:899).). Bu nedenle temiz enerjiye geçiş, sera gazlarını azaltmaya yardımcı olan kritik bir yol olarak kabul edilmektedir (Vo vd., 2020:278). Bu kapsamda nükleer enerji ve yenilenebilir enerji, çevrenin karbondan arındırılması ve çevre kalitesinin sürdürülmesi için kritik öneme sahip temiz ve yeşil araçlar olarak ele alınmaktadır (Saidi ve Omri, 2020:1; Yue vd., 2022:168).

Nükleer enerji, sera gazlarını en aza indirebilen ve en önemlisi günde 24 saat elektrik üretebilen temiz bir enerji kaynağıdır (Lau vd., 2019:13). Nükleer santrallerden birim elektrik başına sera gazı emisyonları, fosil yakıtlı elektrik üretiminden en az iki kat daha düşüktür ve sifıra yakın çoğu yenilenebilir enerjiyle karşılaştırılabilir (Sims, Rogner ve Gregory, 2003:1317). Nükleer enerji kullanımı son 50 yılda CO₂ emisyonlarını 60 gigatondan fazla azaltmıştır (International Energy Agency [IEA], 2019). Dolayısıyla tam karbon nötr olarak adlandırılmasa da diğer enerji yapılarına

kiyasla oldukça sınırlı miktarda sera gazı yayan nükleer enerji, temiz bir enerji geliştirmek için stratejik bir seçimidir (Sadekin vd., 2019:513).

Yenilenebilir enerji, fosil yakıt enerjileri gibi ek kirlilik veya atık üretmediği için temiz enerji olarak adlandırılmaktadır. Bunlar düşük karbon ayak izine sahiptir ve daha az sera gazı üretir (Jaiswal vd., 2022:2). Yenilenebilir enerji ve elektrifikasyon, enerjiyle ilgili CO₂ emisyonu azaltımının %75'ini sağlayabilir; enerji verimliliği de dâhil edilirse bu pay %90'ın üzerine çıkabilir (IRENA, 2019:9). Diğer taraftan yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıt ve uranyum kaynaklarının aksine tükenmez. Uygun ve verimli uygulamalarda optimal bir şekilde kullanılırsa, neredeyse sonsuza kadar güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji sağlayabilirler (Dinçer, 2000:172).

Temiz enerjiye doğru bir geçiş için enerji alanındaki ar-ge faaliyetleri büyük önem taşımaktadır. Özellikle enerji sektörünün 2050 yılına kadar karbon nötrlüğü için, uygun fiyatlı ve sürdürülebilir enerjiye erişim için temiz enerji teknolojilerinin gelişimi ve ülkelerin enerji ar-ge bütçeleri her zamankinden daha önemli bir hale gelmiştir (Trinh, 2023:1). Çünkü teknolojik yeniliklerin çevresel kalite süreçleri üzerindeki etkisi nedeniyle, enerji ar-ge'sine ayrılan kamu bütçelerinin, sera gazı emisyonlarını sınırlamaya veya azaltmaya katkıda bulunması beklenmektedir (Balsalobre, Alvarez ve Cantos, 2015:4882). Özellikle yenilenebilir enerji teknolojilerindeki gelişmeler, Kyoto Protokolü gibi uluslararası anlaşmalarda belirtilen CO₂ emisyonu azaltma hedefine ulaşmada net bir potansiyel göstermiştir (Mourshed ve Quddus, 2009:187). Hükümetlerin enerji ar-ge faaliyetleri için bütçe tahsisleri, çevresel sürdürülebilirliğin yanı sıra enerji güvenliğini sağlamak ve enerji verimliliğini iyileştirmek amacıyla da hükümet stratejilerinin merkezinde yer almaya devam etmektedir (Kassouri, 2022:1).

Atmosferik kirlenme riski yoğunlaştıkça, enerji teknolojileri ar-ge'lerinin daha temiz ve alternatif enerji üretimi sağlayabileceği gerçeği göz önüne alındığında; temiz enerji, enerji ar-ge harcamaları ve karbon ayak izi bağlantısı araştırılmaya değerdir. Buradan hareket ederek bu çalışmada, 1974-2023 döneminde Amerika Birleşik Devletleri'nde temiz enerji tüketimi ve enerji teknolojisi ar-ge harcamalarının çevresel bozulma üzerindeki dinamik ilişkisini araştırmak hedeflenmektedir. Ampirik araştırma için enerji bileşiminde temiz enerjinin payının göreceli olarak yüksek olması, enerji teknolojileri için yüksek miktarda kamu ar-ge bütçesi ayırması ve küresel karbon ayak izine en büyük katkıyı yapan ülkeler arasında ilk sıralarda yer alması nedeniyle ABD ekonomisi ele alınmaktadır. ABD, 2023 yılı itibarıyla küresel sera gazı emisyonlarının %13'ünden sorumlu olarak Çin'den sonra dünyanın en büyük kirlilik yayan ikinci ekonomisidir (Statista, 2024). Our

World in Data (2024) verilerine göre, ABD ekonomisinin enerji bileşiminde 1974 yılında fosil yakıtların payı %93,38 iken bu oran 2023 yılında %80,58'e gerilemiştir. 1974 yılında nükleer enerjinin ve yenilenebilir enerjinin ülkenin birincil enerji tüketimindeki payı ise sırasıyla %1,72 ve %4,90 iken, 2023 yılında bu oranlar sırasıyla %7,77 ve %11,66'ya yükselmiştir. Dolayısıyla ülkenin enerji bileşiminde fosil yakıtların payının azaldığı temiz enerjinin payının ise belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Diğer taraftan ABD'nde GSYİH'nın bin birimi başına enerji teknolojisi ar-ge harcamaları 1974'ten 2023 yılına kadar geçen süreçte 0,523'ten 0,402'ye gerilemiş gibi görünse de ABD, Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency-IEA) üye ülkeleri arasında enerji ar-ge'sine en fazla harcama yapan ülke konumundadır (IEA,2020; IEA, 2024). Buna göre dünyanın en büyük ekonomisi olarak, ABD'nin 2023 yılı itibarıyla temiz enerji yatırımı için ayırdığı bütçe, 559 milyar doların üzerindedir ve en yakın rakiplerini geride bırakmaktadır (World Economic Forum, 2023). ABD toplam enerji ar-ge kamu bütçesi 2010 yılında 6,3 milyar dolar iken 2022 yılında bu oran 9,6 milyar dolara ulaşmıştır. Ülkede ayrıca nükleer enerji de önemli bir hükümet desteği almış ve nükleer enerjiye yönelik harcamalar 2000 yılında 445,2 milyon dolardan 2022 yılında 1,7 milyar dolara çıkarak üç katından fazla artış göstermiştir (Climate Policy Lab, 2024).

Mevcut bu teorik arka planın yanı sıra, çalışmanın güncel literatüre bazı yönleriyle katkı yapması beklenmektedir. (i) Çalışmada temiz enerji ve çevresel bozulma arasındaki ilişki incelenirken literatürde sıklıkla ihmal edilen enerji teknolojileri kamu ar-ge harcamasının rolü analize dâhil edilmiştir. (ii) Değişkenler arasındaki mevcut dinamik bağlantı, temiz enerji projelerine yüksek yatırım yapan, en yüksek ekonomik büyümeye sahip ve enerji teknolojileri için yüksek miktarda ar-ge harcaması yapan gelişmiş bir ekonomi olan ABD ekonomisi için incelenmiştir. Böylelikle elde edilen bulguların temiz enerjiye geçiş sürecinde olan bazı ekonomiler için birtakım yol gösterici politikalar sunması hedeflenmiştir. (iii) Değişkenler arasındaki ilişkiler analiz edilirken hem simetrik hem de asimetrik bağlantıları dikkate alan ARDL ve NARDL yaklaşımından faydalanılmıştır. Böylelikle değişkenlerde meydana gelen pozitif ve negatif şokların çevresel bozulma üzerinde yol açtığı etkiler ayrıştırılarak analiz edilmiştir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde tasarlanmıştır. Bölüm 2'de nükleer enerji, yenilenebilir enerji, enerji teknolojileri ar-ge harcamaları ve çevresel bozulmaya ilişkin mevcut literatür incelenmektedir. Bölüm 3'te veri, yöntem ve bulgulara yer verilmekte; son olarak Bölüm 4'te politika çıkarımları sunulmaktadır.

2. Literatür İncelemesi

Çevre ekonomisi ile ilgili geniş literatürde çevresel bozulmanın göstergesi olarak CO₂ emisyonları, ekolojik ayak izi ya da karbon ayak izi gibi farklı değişkenler ele alınmaktadır. Çevresel kalite göstergesi olarak ele alınan değişkenler farklılık gösterse de nihai amaç çevresel bozulmanın belirleyicilerini tespit etmektir. Ele alınan teorik çerçeve kapsamında mevcut literatürü temiz enerji-çevresel bozulma ve enerji teknolojileri ar-ge-çevresel bozulma bağlantısı olmak üzere iki ayrı başlık altında incelemek mümkündür.

2.1. Temiz enerji-çevresel bozulma bağlantısı

Temiz enerji olarak nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kullanımı ile çevresel bozulma arasındaki bağlantıyı inceleyen mevcut literatürde pek çok çalışma, nükleer ve yenilenebilir enerjinin çevresel bozulmanın azaltılmasında kritik bir rol oynadığını tespit etmişlerdir. Örneğin; Baek (2016) çalışmasında, 1960-2010 döneminde ABD’de nükleer ve yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki rolünü araştırmışlardır. ARDL yaklaşımı bulguları, nükleer enerji tüketiminin kısa ve uzun vadede CO₂ emisyonlarını azalttığını, yenilenebilir enerji tüketiminin ise yalnızca kısa vadede CO₂ emisyonlarını azalttığını göstermiştir. Lee, Kim ve Lee (2017) çalışmalarında, 1970-2015 döneminde küresel nükleer reaktörlerin %95’ini kapsayan 18 ülkede nükleer güç oranı ile kişi başına CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Panel dinamik sıradan en küçük kareler yöntemi (PDOLS) bulguları, nükleer güçte %1’lik bir artışın kişi başına CO₂ emisyonlarında %0,26-0,32’lik bir azalmaya yol açtığını göstermiştir. Dong vd. (2018) çalışmalarında, 1993-2016 döneminde Çin’de Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) çerçevesinde nükleer enerji ve yenilenebilir enerjinin ülkenin CO₂ emisyonları üzerindeki rolünü analiz etmişlerdir. ARDL sınır testi bulguları, hem kısa hem de uzun vadede nükleer enerjinin ve yenilenebilir enerjinin CO₂ emisyonlarını azaltmada önemli roller oynadığını ancak nükleer enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki azaltma etkisinin, yenilenebilir enerji tüketimininkinden önemli ölçüde daha küçük olduğunu göstermiştir. Saidi ve Omri (2020) çalışmalarında, 1990-2018 döneminde 15 OECD ülkesi için tam değiştirilmiş en küçük kareler yöntemi (FMOLS) ve vektör hata düzeltme modeli yaklaşımı (VECM) ile yenilenebilir ve nükleer enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ampirik bulgular, nükleer ve yenilenebilir enerjinin uzun vadede CO₂ emisyonlarını azalttığını göstermiştir. Usman vd. (2022) çalışmalarında, 1991-2020 döneminde Pakistan’da nükleer enerjinin, yenilenebilir enerjinin ve çevre teknolojilerinin Pakistan’ın ekolojik ayak izi üzerindeki asimetrik etkilerini incelemişlerdir. NARDL yaklaşımı bulguları,

nükleer enerjideki negatif, yenilenebilir enerjideki ise pozitif ve negatif şokların uzun vadede ülkenin kirlilik seviyesini azalttığını göstermiştir. Usman ve Radulescu (2022) çalışmalarında, 1990-2019 döneminde en yüksek nükleer enerji üreten ülkelerde bazı açıklayıcı değişkenlerle birlikte nükleer enerjinin, teknolojik yeniliklerin ve yenilenebilir enerjinin karbon ayak izi üzerindeki rolünü araştırmışlardır. Panel analiz bulguları, nükleer ve yenilenebilir enerji tüketiminin çevresel kaliteyi büyük ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Çakar vd. (2022) çalışmalarında, 1970-2015 döneminde G7 ülkelerinde nükleer enerji tüketimi ve teknolojik yeniliğin çevre kalitesine etkisini araştırmışlardır. Panel eşik regresyon modeli bulguları, nükleer enerji tüketiminin belirli bir inovasyon seviyesinden sonra karbon emisyonlarını daha fazla azalttığını göstermiştir. Kartal vd. (2023) çalışmalarında, 1965Q1-2018Q4 döneminde ABD’nde nükleer ve yenilenebilir enerji tüketiminin ekolojik kalite üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kantil Bootstrap Fourier Granger Nedensellik yaklaşımı bulguları, hem nükleer hem de yenilenebilir enerjinin ekolojik bozulmayı azalttığını göstermiştir.

Literatürdeki bazı çalışmalar, nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kullanımının ülkelerin çevresel kaliteleri üzerindeki etkilerinin farklı yönlerde olduğunu savunmaktadırlar. Örneğin; Apergis vd. (2010) çalışmalarında, 1984-2007 döneminde 19 gelişmiş ve gelişmekte olan ülke grubu için CO₂ emisyonları, nükleer enerji tüketimi ve yenilenebilir enerji tüketimi arasındaki nedensel ilişkiyi panel hata düzeltme modeli ile incelemişlerdir. Ampirik kanıtlar, nükleer enerji tüketimi ile emisyonlar arasında negatif bir ilişki bulunurken, emisyonlar ile yenilenebilir enerji tüketimi arasında pozitif bir ilişki olduğuna işaret etmiştir. Menyah ve Wolde-Rufael (2010) çalışmalarında, 1960-2007 döneminde ABD’de yenilenebilir ve nükleer enerji tüketimi ile CO₂ emisyonları arasındaki nedensel ilişkiyi araştırmışlardır. Granger nedensellik analizi bulguları, ABD’nin nükleer enerji tüketimini artırarak CO₂ emisyonlarını azaltabileceğini ancak yenilenebilir enerji tüketiminin, emisyon azaltımına önemli bir katkıda bulunabileceği bir seviyeye ulaşmadığını göstermiştir. Pata ve Kartal (2023) çalışmalarında, 1977-2018 döneminde Güney Kore’de nükleer ve yenilenebilir enerji tüketiminin çevre kalitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. ARDL yaklaşımı bulguları, nükleer enerjinin çevre kalitesi üzerinde iyileştirici bir etkiye sahip olduğuna ancak yenilenebilir enerjinin çevre üzerinde uzun vadede önemli bir etkiye sahip olmadığına işaret etmiştir.

Sınırlı sayıda olmak koşuluyla bazı çalışmalar ise, nükleer ve yenilenebilir enerjinin çevresel kalite üzerinde anlamsız ya da olumsuz bir etki yarattığını savunmaktadır. Örneğin; Al-mulali (2014) çalışmasında, 1990-2010 döneminde nükleer enerji tüketen 30 ülkede nükleer enerji tüketiminin CO₂

emisyonu üzerindeki etkisini araştırmıştır. Panel analiz bulguları, nükleer enerji tüketiminin emisyonlar üzerinde uzun vadede anlamlı bir etkisi olmadığını göstermiştir. Farhani ve Shahbaz (2014) çalışmalarında, 1980-2009 döneminde 10 Orta Doğu ve Kuzey Afrika (MENA) ülkesi için yenilenebilir ve yenilenemeyen elektrik tüketimi ile CO₂ emisyonları arasındaki nedensel ilişkiyi araştırdıkları çalışmalarında, panel DOLS ve FMOLS bulguları yenilenebilir elektrik tüketiminin CO₂ emisyonlarına katkıda bulunduğunu işaret etmiştir. Bölük ve Mert (2014) çalışmalarında, 1990-2008 döneminde 16 Avrupa Birliği (AB) ülkesinde karbon emisyonları ile yenilenebilir ve fosil enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Panel analiz bulguları, yenilenebilir enerji tüketiminin fosil enerji tüketiminden daha az oranda olsa da emisyonları artırdığını göstermiştir. Bulut (2017) çalışmasında, 1970-2013 döneminde yenilenemeyen ve yenilenebilir enerjinin Türkiye'deki CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Zamanla değişen DOLS ve FMOLS tahmin bulguları, ülkede CO₂ emisyonlarının yenilenebilir enerji ile pozitif ilişkili olduğunu göstermiştir. Mahmood, Wang ve Zhang (2020) çalışmalarında, 1973-2017 döneminde Pakistan için nükleer enerji ve CO₂ emisyonları arasındaki bağlantıyı araştırmışlardır. ARDL yaklaşımı bulguları, nükleer enerjinin ülkenin CO₂ emisyonlarını hızlandırdığını göstermiştir.

2.2. Enerji ar-ge harcamaları-çevresel bozulma bağlantısı

Özellikle dördüncü sanayi devriminin mevcut bağlamında, enerji ar-ge ve çevresel sürdürülebilirlik sıklıkla birbiriyle bağlantılı iki faktör olarak anılmaktadır (Bilgili vd., 2021). Bu nedenle çevre ekonomisi literatürü, teknolojik gelişmenin, yeniliklerin ve ar-ge harcamalarının çevresel sürdürülebilirlikle olan bağlantısını araştıran çalışmalarla genişlemektedir. Bu çalışmalardan pek çoğu ar-ge harcamalarının ve teknolojik yeniliklerin ülkelerin çevresel kalitelerini iyileştirmeye yardımcı olduğunu savunmaktadır. Örneğin, Balsalobre vd. (2015) çalışmalarında, 1994-2010 döneminde 28 OECD ülkesi için enerji odaklı kamu ar-ge bütçesi ile emisyonlar arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Panel analiz bulguları, enerji yeniliklerinin çevre kalitesi üzerindeki olumsuz etkiyi hafifletmeye yardımcı olduğunu göstermiştir. Álvarez-Herránza vd. (2017) çalışmalarında, 1990-2014 döneminde 28 OECD ülkesinde enerji ar-ge gelişmelerinin emisyonlar üzerindeki etkisini panel analiz tekniğiyle araştırmışlardır. Ampirik bulgular, enerji teknolojisindeki ilerlemelerin çevre kalitesini iyileştirmede önemli bir rol oynadığına işaret etmiştir. Jin vd. (2017) çalışmalarında, 1995-2012 döneminde Çin'de OLS yaklaşımıyla enerji sektöründeki ar-ge ilerlemesinin karbon emisyonlarını azaltmada etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Fernandez, Lopez ve Blanco (2018) çalışmalarında, 1990-2013 döneminde

ABD, AB ve Çin için ar-ge faaliyetlerinin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini OLS modeliyle analiz etmişlerdir. Bulgular, gelişmiş ülkelerdeki ar-ge harcamalarının CO₂ emisyonlarını azaltmada etkili olduğunu göstermiştir. Bilgili vd. (2021) çalışmalarında, 2003-2018 döneminde on üç gelişmiş ülkede ayrıştırılmış enerji ar-ge'sinin çevre kirliliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Panel kantil regresyon analizi bulguları, enerji verimliliği ar-ge'sinin fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji ar-ge'sine kıyasla emisyonları azaltmada daha etkili olduğunu göstermiştir. Li vd. (2021) çalışmalarında, 2002-2015 döneminde 52 ülkede genelleştirilmiş momentler yöntemi (GMM) ile ar-ge girdisinin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini araştırmışlar ve ar-ge'nin CO₂ emisyonlarını azaltmada etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Suki vd. (2022) çalışmalarında, 1980-2018 döneminde yenilenebilir enerji ve teknolojik yeniliklerin Malezya'daki ekolojik ayak izini ve CO₂ emisyonunu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bootstrap ARDL yaklaşımı bulguları, teknolojik yeniliklerin hem karbon emisyonunu hem de ekolojik ayak izini azaltmaya yardımcı olduğunu göstermiştir. Khan vd. (2022) çalışmalarında, 1979-2019 döneminde Kuşak ve Yol Girişimi (Belt and Road Initiative Countries) ülkelerinde yeniliğin, yenilenebilir enerji tüketiminin ve ekonomik büyümenin CO₂ emisyonu üzerindeki rolünü incelemişlerdir. OLS ve GMM bulguları, yeniliğin çevre kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiğine işaret etmiştir.

Mevcut bu çalışmaların aksine literatürdeki bazı çalışmalar teknolojik yeniliklerin ve ar-ge faaliyetlerinin çevre kalitesini etkilemediğini ya da olumsuz etkilediğini savunmaktadır. Bu bulgu, bazı ülkelerdeki mevcut teknolojilerin veya teknolojik yeniliklerin temiz olmadığına işaret etmektedir. Bu çalışmalardan örneğin, Garrone ve Grilli (2010) çalışmalarında, 1980-2004 döneminde 13 gelişmiş ülkede dinamik panel modeller aracılığıyla kamusal enerji ar-ge harcamalarının CO₂ yoğunluğu üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı bulgusuna ulaşmışlardır. Cheng, Li ve Liu (2017) çalışmalarında, 1997-2014 döneminde Çin'in 30 eyaletinde teknolojik gelişmenin karbon emisyonu üzerindeki etkisini dinamik mekansal panel veri tahmincisi ile araştırmışlardır. Bulgular, teknolojik gelişmenin Çin'deki CO₂ emisyonları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Gu vd (2019) çalışmalarında, 2005-2016 döneminde Çin'deki 30 eyalet için GMM modeliyle enerji teknolojisi yeniliklerinin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Ampirik bulgular, enerji teknolojik ilerlemesinin başlangıçta emisyonları artırdığını sonra azalttığını, ancak geri tepme etkisinin emisyonların artışı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olmaya devam ettiğini göstermiştir. Koçak ve Ulucak (2019) çalışmalarında, 2003-2015 döneminde 19 OECD ülkesinde enerji ar-ge harcamalarının

CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Dinamik panel veri analizi bulguları, enerji verimliliği ve fosil enerji ar-ge harcamalarının CO₂ emisyonlarını arttırdığını, yenilenebilir enerji ar-ge harcamalarının ise CO₂ emisyonları üzerinde anlamlı bir etki yaratmadığını göstermiştir. Usman ve Hammar (2021) çalışmalarında, 1990-2017 döneminde Asya Pasifik Ekonomik İşbirliği (APEC) ülkelerinde bazı açıklayıcı değişkenlerle birlikte teknolojik yeniliklerin ekolojik ayak izi üzerindeki etkisini incelemiştir. STIRPAT modeli bulguları, teknolojik yenilik faaliyetlerindeki artışın çevre kalitesi üzerinde %0.099 oranında olumsuz bir etkisi olduğunu göstermiştir.

3. Veri, Yöntem ve Bulgular

3.1. Veri

Karbon ayak izi modellemesinde nükleer enerjinin, yenilenebilir enerjinin ve enerji ar-ge harcamalarının rolünü incelemek için Koçak ve Ulucak (2019), Saidi ve Omri (2020), Bilgili vd. (2021) ve Usman ve Radulescu (2022)'nin çalışmalarına dayanarak temel regresyon modeli şu şekilde oluşturulmuştur:

$$LNCFP_t = \alpha_0 + \beta_1 LNNE_t + \beta_2 LNRE_t + \beta_3 LNRD_t + \mu_t \quad (1)$$

Burada t zamanı, β 'lar değişkenlerin katsayılarını, μ hata terimini, ln ise değişkenlerin doğal logaritmasını göstermektedir. Ayrıca CFP karbon ayak izini; NE , RE ve RD ise sırasıyla nükleer enerji kullanımını, yenilenebilir enerji kullanımını ve kamu enerji ar-ge harcamalarını temsil etmektedir. ABD için 1974-2023 dönemini kapsayan veri setindeki değişkenlerin tamamının ayrıntılı tanımlarına ve veri kaynaklarına Tablo 1'de yer verilmiştir.

Tablo 1. Değişken Tanımları ve Veri Kaynakları

Değişken	Kısaltma	Birim	Kaynak
Karbon Ayak izi	CFP	Kişi başına düşen küresel hektar	Global Footprint Network (2024)
Nükleer Enerji	NE	Nükleer enerjinin birincil enerji tüketimindeki payı (%)	Our World in Data (2024)
Yenilenebilir Enerji	RE	Yenilenebilir enerjinin birincil enerji tüketimindeki payı (%)	Our World in Data (2024)
Kamu Enerji Ar-Ge Harcamaları	RD	2023 fiyatlarıyla milyon ABD Doları ve satın alma gücü paritesi	International Energy Agency (IEA) (2024)

Modelde ele alınan tüm serilerin tanımlayıcı istatistikleri Tablo 2’de sunulmaktadır. Buna göre, tüm serilerin ortalama değerleri pozitif ve en yüksek ortalama değere nükleer enerji serisi sahipken, en düşük ortalama değere enerji ar-ge harcamaları serisi sahiptir. Ayrıca en düşük minimum değere enerji ar-ge serisi, en yüksek maksimum değere ise yenilenebilir enerji serisi sahiptir.

Tablo 2. Tanımlayıcı Özet İstatistikler

Değişken	Ortalama Değer	Minimum	Maksimum	Standart Sapma	Jarque-Bera
LNCFP	15.700	15.300	15.921	0.160	4.621 (0.099)**
LNNE	15.712	14.355	16.009	0.385	33.679 (0.000)
LNRE	15.500	15.045	16.271	0.320	8.553 (0.013)
LNRD	8.737	8.150	9.513	0.377	3.361 (0.186)**

*Not: Parantez içerisindeki değerler Jarque-Bera olasılık değerlerini; ** ise %5 anlamlılık düzeyini temsil etmektedir.*

Ek olarak Tablo-2’de Jarque-Bera test istatistiği sonuçları, nükleer enerji ve yenilenebilir enerji serisinin normal dağılmadığını, karbon ayak izi ve enerji ar-ge serisinin ise normal dağılıma sahip olduğunu göstermektedir. Normal dağılımdan sapmalar, NARDL yaklaşımı uygulamasını rasyonalize eden zaman eğilimli veri davranışını yansıtmaktadır (Usman vd. (2022)).

3.2. Yöntem

ARDL modeli, farklı entegrasyon derecelerine sahip (I(0) ya da I(1) gibi) doğrusal değişkenler arasındaki eşbütünleşme ilişkisinin araştırılmasına imkan tanımaktadır. Bu kapsamda y_t bağımlı değişken, $x_{j,t}$ $j = 1, \dots, k$ bağımsız değişkenler olmak üzere $ARDL(p, q_1, \dots, q_k)$ modeli eşitlik 2’deki gibidir (Pesaran, Shin ve Smith, 2001):

$$y_t = a_0 + a_1 t + \sum_{i=1}^p \psi_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^k \sum_{l_j=0}^{q_j} \beta_{j,l_j} x_{j,t-l_j} + \epsilon_t \quad (2)$$

Eşitlik 2’de, a_0 sabit terim, a_1 doğrusal trend katsayısı, ψ_i bağımlı değişkenin gecikmeli değerlerinin katsayılarını $i = (1, \dots, p)$, β_{j,l_j} k

bağımsız değişkeninin gecikmeli değerlerinin katsayılarını, ϵ_t ise hata terimini göstermektedir.

Sabitli ve trendli model altında seriler arasındaki eşbütünleşme ilişkisi sınır testi yaklaşımıyla eşitlik 3'teki model üzerinden sınanmaktadır:

$$\Delta y_t = a_0 + a_1 t + b_0 y_{t-1} + \sum_{j=1}^k b_j x_{j,t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} c_{0,i} \Delta y_{t-i} + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^{q_j-1} c_{j,l} \Delta x_{j,t-l} + \sum_{j=1}^k d_j \Delta x_{j,t} + \epsilon_t \quad (3)$$

Bu modelden elde edilen hata düzeltme denklemini ise,

$$EC_t = y_t - \sum_{j=1}^k \frac{b_j}{b_0} x_{j,t} \quad \text{şeklinde elde edilmektedir. Seriler arasındaki}$$

eşbütünleşme ilişkisi için aşağıdaki hipotezler test edilmektedir:

$$H_0 : b_0 = b_j = 0, \forall_j \quad (\text{eşbütünleşme yoktur})$$

$$H_1 : b_0 \neq b_j \neq 0, \forall_j \quad (\text{eşbütünleşme vardır})$$

Asimetrik etkileri hesaba katan NARDL yaklaşımı ise, doğrusal (simetrik) ARDL modelinin bir uzantısıdır. Bu yaklaşım, dışsal değişkeni pozitif ve negatif şoklara ayırıştırarak, uzun ve kısa vadede asimetrik etkilerin incelenmesine yardımcı olmaktadır. Böylelikle NARDL analizi aracılığıyla, hem değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki olumlu ve olumsuz etkileri hem de uzun ve kısa vadede asimetrik bir etkiye neden olup olmadığı analiz edilmektedir. NARDL modelinin denklemini elde etmeden önce, değişkenler arasındaki asimetrik uzun dönem regresyonu eşitlik 4'te gösterildiği gibi yazılabilir (Shin, Yu ve Greenwood-Nimmo 2014):

$$\gamma_t = \beta^+ x_t^+ + \beta^- x_t^- + u_t \quad (4)$$

$$\Delta x_t = v_t \quad (5)$$

Denklemler (4)'te yer alan γ_t ve x_t I(1) olan iki değişken iken; β^+ ve β^- uzun dönem parametrelerini ifade etmektedir. x_t^+ ve x_t^- ise sırasıyla x_t 'de ortaya çıkan pozitif ve negatif değişmelerin kısmi toplamlarını göstermektedir.. Bu kapsamda;

$$x_t^+ = \sum_{j=1}^t \Delta x_j^+ = \sum_{j=1}^t \max(\Delta x_j, 0) \quad \text{ve} \quad x_t^- = \sum_{j=1}^t \Delta x_j^- = \sum_{j=1}^t \min(\Delta x_j, 0) \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Böylelikle doğrusal olmayan ARDL (p,q) modeli şu şekilde yazılabilir:

$$y_t = \sum_{j=1}^p \phi_j y_{t-j} + \sum_{j=0}^q (\theta_j^+ x_{t-j}^+ + \theta_j^- x_{t-j}^-) + \varepsilon_t \quad (7)$$

Eşitlik (7)'de x_t , $x_t = x_0 + x_t^+ + x_t^-$ şeklinde tanımlanmış $k \times 1$ biçiminde bir vektördür. Denklemdaki ϕ_j otoregresif parametreyi, θ_j^+ ve θ_j^- ise asimetrik dağılmış gecikme parametrelerini temsil etmektedir.

Pesaran vd. (2001)'in çalışmasında yer verilen doğrusal ARDL modeli kapsamında (7) no'lu denklemi doğrusal olmayan hata düzeltme modeli formunda (8) no'lu eşitlikte gösterildiği gibi ifade etmek mümkündür:

$$\Delta y_t = p y_{t-1} + \theta^+ x_{t-1}^+ + \theta^- x_{t-1}^- + \sum_{j=1}^{p-1} \gamma_j \Delta y_{t-j} + \sum_{j=0}^{q-1} (\varphi_j^+ \Delta x_{t-j}^+ + \varphi_j^- \Delta x_{t-j}^-) + \varepsilon_t \quad (8)$$

Buradan hareketle x değişkeninin y değişkeni üzerindeki pozitif ve negatif değişimlerinin uzun dönemli etkileri $\beta^+ = -\theta^+ / p$ ve $\beta^- = -\theta^- / p$ şeklinde ölçülmektedir.

(8) no'lu bu eşitlik NARDL yaklaşımı için tahmin edilen eşbütünleşme denklemini göstermektedir. Bu denklem tahmin edildikten sonra değişkenler arasında eşbütünleşme ilişkisi olup olmadığını tespit etmek için iki farklı yöntem söz konusudur. Bunlardan ilki; Banerjee, Dolado ve Mestre (1998)'in çalışmasında yer alan t_{BDM} olarak adlandırılan t testi yaklaşımıdır. Bunun için test edilen hipotez $H_0 : p = 0$ ve $H_1 : p < 0$ şeklindedir. İkincisi ise; Pesaran vd. (2001)'in çalışmasında bulunan F_{PSS} olarak bilinen F testi yaklaşımıdır. Bunun için test edilen hipotez ise $H_0 : p = \theta^+ = \theta^- = 0$ şeklindedir.

Değişkenler arasında eşbütünleşme ilişkisinin varlığı doğrulandıktan sonra öncelikle değişkenler arasındaki uzun dönemli asimetri ilişkileri tespit edilmektedir. Uzun dönem asimetri için test edilen hipotez $H_0 : \theta^+ = \theta^-$ biçimindedir. İkinci olarak da pozitif ve negatif uzun dönem parametreleri hesaplanmaktadır. Bunun için test edilen sıfır hipotezleri ise sırasıyla $\beta^+ = -(\theta^+ / p) = 0$ ve $\beta^- = -(\theta^- / p) = 0$ şeklindedir.

3.3. Bulgular

ARDL ve NARDL modellerini tahmin etmeden önce değişkenlerin durağanlık seviyelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla uygulanmış olan birim kök test bulgularına Tablo 3'te yer verilmektedir.

Tablo 3. Birim Kök Test Bulguları

Değişkenler	ADF (Seviye)	ADF (Birinci Fark)	Philips Perron (PP) (Seviye)	Philips Perron (PP) (Birinci Fark)
LNCFP	-1.612 (0.773)	-6.553 (0.000)*	-1.690 (0.740)	-6.544 (0.000)*
LNNE	-4.462 (0.004)*	-9.605 (0.000)*	-4.334 (0.006)*	-10.974 (0.000)*
LNRE	-1.353 (0.862)	-7.314 (0.000)*	-1.353 (0.862)	-7.369 (0.000)*
LNRD	-1.334 (0.867)	-8.655 (0.000)*	-2.057 (0.556)	-8.624 (0.000)*

*Not: Tablodaki değerler sabit ve trendli model altında ADF ve PP testinin t istatistiklerini, parantez içerisindeki değerler olasılık değerlerini *, ** ve *** ise sırasıyla %1, %5 ve %10 anlamlılık düzeyini temsil etmektedir.*

ADF ve PP birim kök testi bulgularına göre, nükleer enerji serisinin düzeyde, diğer tüm serilerin ise birinci farklarında durağan olduğu gözlemlenmektedir. Bu bulgular, değişkenler arasındaki ilişkiyi analiz etmek için ARDL ve NARDL yaklaşımlarının uygulanmasına ilişkin varsayımı yerine getirmektedir.

Tablo 4. ARDL ve NARDL Sınır Testi Bulguları

ARDL Sınır Testi Bulguları				
Test İstatistiği	Değer	Anlamlılık Düzeyi	I(0)*	I(1)*
F istatistiği k	5.029 3	%10	2.37	3.2
		%5	2.79	3.67
		%1	3.65	4.66
NARDL Sınır Testi Bulguları				
Test İstatistiği	Değer	Anlamlılık Düzeyi	I(0)*	I(1)*
F istatistiği k	5.972 6	%10	1.99	2.94
		%5	2.27	3.28
		%1	2.88	3.99

*Not: * Narayan (2005) tarafından üretilen kritik değerlerin alt ve üst sınırlarını göstermektedir.*

Tablo 4'teki bulgulara göre, F istatistik değeri ARDL analizi için 5.029, NARDL analizi içinse 5.972 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, tüm anlamlılık düzeylerinde üst kritik değerlerden daha büyük olduğundan "*H₀: Eşbütünlük yoktur*" şeklindeki boş hipotez reddedilmektedir. Buna

göre, değişkenler eşbütünlüktür diğer bir ifadeyle değişkenler arasında uzun dönemli bir denge ilişkisi söz konusudur. Uzun ve kısa dönem denge ilişkisine ait bulgulara Tablo 5'te yer verilmektedir.

Tablo 5. ARDL Uzun ve Kısa Dönem Tahmin Bulguları

Uzun Dönem Bulguları (Bağımlı Değişken: LNCFP)			
Uygun Model: ARDL(2,3,2,3)			
Değişken	Katsayı	Standart Hata	Olasılık Değeri
LNNE	-0.244	0.077	0.003*
LNRE	-0.287	0.068	0.000*
LNRD	-0.197	0.075	0.013**
Kısa Dönem Bulguları (Bağımlı Değişken: ΔLNCFP)			
Uygun Model: ARDL(2,3,2,3)			
Değişken	Katsayı	Standart Hata	Olasılık Değeri
ΔLNCFP(-1)	0.319	0.130	0.019**
ΔLNNE	-0.437	0.103	0.000*
ΔLNNE(-1)	0.118	0.107	0.277
ΔLNNE(-2)	-0.193	0.079	0.020**
ΔLNRE	-0.367	0.056	0.000*
ΔLNRE(-1)	0.070	0.070	0.327
ΔLNRD	-0.031	0.028	0.273
ΔLNRD(-1)	0.133	0.038	0.001*
ΔLNRD(-2)	0.094	0.033	0.007*
ECT(-1)	-0.618	0.116	0.000*
Tanısal Test Bulguları		İstatistik	Olasılık Değeri
Değişen Varyans Testi: Breusch-Pagan-Godfrey		7.176	0.892
Serisel Otokorelasyon Testi: Breusch-Godfrey		5.074	0.079
Normallik Testi: Jarque-Bera		11.763	0.002
Spesifikasyon Testi: Ramsey Reset		0.549	0.463

*Not: Δ, değişkenlerin birinci farkını *, ** ve *** sırasıyla %1, %5 ve %10 anlamlılık düzeylerini temsil etmektedir.*

ARDL uzun ve kısa dönem bulgularına geçmeden önce; katsayıların tutarlılığı ve güvenilirliği açısından ilk olarak tanısal test sonuçlarını incelemek gerekmektedir. Buna göre seçilen uygun modelde normal dağılmama hariç değişen varyans ve otokorelasyon gibi herhangi bir spesifikasyon problemi olmadığı gözlemlenmektedir. Uzun dönem bulgularına göre; nükleer enerji,

yenilenebilir enerji ve enerji ar-ge harcamalarının her biri ABD'nin karbon ayak izi üzerinde anlamlı ve negatif bir etki yaratmaktadır. Diğer bir ifadeyle modelde yer alan tüm değişkenler ülkenin karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Ancak doğrusal bu model altında yenilenebilir enerji nükleer enerjiye kıyasla ülkenin karbon ayak izinin azaltılmasında görece daha etkilidir. Buna göre, yenilenebilir enerjideki %1'lik bir artış ülkenin karbon ayak izini %0.287 oranında azaltırken, nükleer enerjideki %1'lik bir artış ülkenin karbon ayak izini %0.244 oranında azaltmaktadır. Ülkedeki enerji ar-ge harcamalarındaki %1'lik bir artışın karbon ayak izini %0.197 oranında azaltması ise enerji alanında yapılan teknolojik gelişmelerin ülkenin çevresel kalitesini artırmaya yardımcı olduğunu göstermektedir.

Kısa dönem bulgularına bakıldığında ilk olarak, hata düzeltme katsayısı (ECT) negatif ve anlamlıdır. Buna göre, geçmiş dönemde meydana gelen sapmaların yaklaşık %62'si bir sonraki dönemde denge düzeyine gelerek düzelmektedir. Kısa dönemde, karbon ayak izinin kendi gecikmeli değerleri ülkenin mevcut karbon ayak izi üzerinde anlamlı ve pozitif bir etki yaratmaktadır. Uzun dönemde olduğu gibi kısa dönemde de nükleer enerji ve yenilenebilir enerji ülkenin karbon ayak izi üzerinde anlamlı ve negatif bir etki yaratmaktadır. Ancak uzun dönemin aksine kısa dönemde nükleer enerjinin karbon ayak izi üzerindeki azaltıcı etkisi yenilenebilir enerjiden daha yüksektir. Buna göre, nükleer enerjideki %1'lik bir artış karbon ayak izini %0.437 oranında azaltırken, yenilenebilir enerjideki %1'lik bir artış karbon ayak izini %0.367 oranında azaltmaktadır. Son olarak, enerji ar-ge harcamalarının ise gecikmeli değerlerinin karbon ayak izi üzerinde anlamlı ve pozitif bir etkisi bulunmaktadır. Diğer bir ifadeyle enerji ar-ge harcamaları karbon ayak izini yapıldığı dönemde değil gecikmeli olarak etkilemekte ve bu etki çevresel kaliteyi iyileştirici değil bozucu yönde bir etki yaratmaktadır. Bu durum Bilgili vd. (2021)'nin çalışmasında vurgulandığı gibi, yenilenebilir enerjiye yönelik ar-ge faaliyetlerinin karbon yakalama ve depolama tekniklerini barındırmadığı durumda bu kaynakların emisyonları azaltmada etkili olmamaları ile açıklanabilir.

Tablo 6. NARDL Uzun ve Kısa Dönem Tahmin Bulguları

Uzun Dönem Bulguları (Bağımlı Değişken: LNCFP) Uygun Model: NARDL(4,3,4,3,4,4,4)			
Değişken	Katsayı	Standart Hata	Olasılık Değeri
LNNE ⁺	-0.216	0.074	0.013**
LNNE ⁻	-0.846	0.162	0.000*
LNRE ⁺	-0.831	0.076	0.000*
LNRE ⁻	-0.437	0.062	0.000*
LNRD ⁺	-0.054	0.036	0.159
LNRD ⁻	-0.303	0.041	0.000*
Kısa Dönem Bulguları (Bağımlı Değişken: ΔLNCFP) Uygun Model: NARDL(4,3,4,3,4,4,4)			
Değişken	Katsayı	Standart Hata	Olasılık Değeri
ΔLNCFP(-1)	1.194	0.132	0.000*
ΔLNCFP(-2)	0.791	0.156	0.000*
ΔLNCFP(-3)	0.326	0.080	0.001**
ΔLNNE ⁺	-0.113	0.104	0.301
ΔLNNE ⁺ (-1)	-0.050	0.126	0.699
ΔLNNE ⁺ (-2)	0.247	0.106	0.038**
ΔLNNE ⁻	-1.457	0.230	0.000*
ΔLNNE ⁻ (-1)	-0.445	0.184	0.032**
ΔLNNE ⁻ (-2)	-1.003	0.165	0.000*
ΔLNNE ⁻ (-3)	-1.046	0.226	0.000*
ΔLNRE ⁺	-0.533	0.073	0.000*
ΔLNRE ⁺ (-1)	1.386	0.158	0.000*
ΔLNRE ⁺ (-2)	0.830	0.145	0.000*
ΔLNRE ⁻	-0.330	0.096	0.005*
ΔLNRE ⁻ (-1)	0.176	0.132	0.205
ΔLNRE ⁻ (-2)	0.621	0.119	0.000*
ΔLNRE ⁻ (-3)	0.768	0.125	0.000*
ΔLNRD ⁺	0.102	0.034	0.011**
ΔLNRD ⁺ (-1)	0.291	0.046	0.000*
ΔLNRD ⁺ (-2)	0.285	0.053	0.000*
ΔLNRD ⁺ (-3)	0.166	0.053	0.008*
ΔLNRD ⁻	-0.067	0.036	0.093***
ΔLNRD ⁻ (-1)	0.492	0.077	0.000*
ΔLNRD ⁻ (-2)	0.423	0.071	0.000*

$\Delta\text{LNRD}(-3)$	0.155	0.040	0.002**
$\text{ECT}(-1)$	-2.120	0.243	0.000*
Asimetri Wald Test $\text{WNE}_{\text{LR}}: 1.027 (0.318)$ $\text{WRE}_{\text{LR}}: 0.008 (0.926)$ $\text{WRD}_{\text{LR}}: 0.138 (0.712)$			
Tanısal Test Bulguları	İstatistik	Olasılık Değeri	
Değişen Varyans Testi: Breusch-Pagan-Godfrey	31.566	0.488	
Serisel Otokorelasyon Testi: Breusch-Godfrey	1.143	0.357	
Normallik Testi: Jarque-Bera	7.543	0.023	
Spesifikasyon Testi: Ramsey Reset	2.245	0.162	

*Not: Δ , değişkenlerin birinci farkını *, ** ve *** sırasıyla %1, %5 ve %10 anlamlılık düzeylerini, W_{LR} ise uzun dönem asimetrisini göstermektedir. Ayrıca serilerin üzerinde yer alan + ve - işaretleri sırasıyla serilerin pozitif ve negatif bileşenlerini temsil etmektedir.*

Tablo 6'da yer verilen NARDL uzun ve kısa dönem bulgularına geçmeden önce, incelenen modelde ARDL analizinde olduğu gibi normal dağılmama hariç değişen varyans ve otokorelasyon gibi bir spesifikasyon problemi bulunmadığı gözlemlenmektedir. Bu aşamadan sonra değişkenler arasındaki uzun dönemli asimetri ilişkisi sınanmış olup nükleer enerjinin, yenilenebilir enerjinin ve enerji ar-ge harcamalarının (sırasıyla $\text{WNE}_{\text{LR}}: 1.027(0.318)$, $\text{WRE}_{\text{LR}}: 0.008(0.926)$ ve $\text{WRD}_{\text{LR}}: 0.138(0.712)$) hiçbirinin ülkenin karbon ayak izi üzerinde anlamlı bir asimmetrik etki yaratmadığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, uzun dönemde bağımsız değişkenlerde meydana gelen pozitif ve negatif şokların karbon ayak izi üzerindeki etkilerinin aynı yönlü olduğu anlamına gelmektedir.

Modele yönelik tanısal testler ve asimmetrik ilişkiler tespit edildikten sonra uzun ve kısa dönem bulgularına geçmek mümkündür. Uzun dönem bulgularına göre; ABD'de nükleer enerjide meydana gelen %1'lik bir pozitif şok karbon ayak izini %0.216 oranında azaltırken, %1'lik negatif bir şok karbon ayak izini %0.846 oranında azaltmaktadır. Buna göre, nükleer enerjide meydana gelen negatif bir şokun pozitif şoklara kıyasla karbon ayak izi üzerindeki azaltıcı etkisi daha yüksektir. Yenilenebilir enerjideki gelişmelere bakıldığında; uzun dönemde bu kaynaklarda meydana gelen pozitif şoklardaki %1'lik bir artış karbon ayak izini %0.831 oranında azaltırken, negatif şoklardaki %1'lik bir artış karbon ayak izini %0.437 oranında azaltmaktadır. Bu durum ülkede yenilenebilir enerji kullanımındaki artışların çevresel bozulma üzerindeki iyileştirici etkisini açıkça ortaya

koymaktadır. Son olarak uzun dönemde enerji ar-ge harcamalarındaki pozitif şoklar karbon ayak izi üzerinde anlamlı bir etki yaratmazken, negatif şoklardaki %1'lik bir artış karbon ayak izini %0.303 oranında azaltmaktadır.

Kısa dönem bulgularına bakıldığında; öncelikle hata düzeltme teriminin (ECT) katsayısı negatif, anlamlı fakat -2'den küçüktür. Katsayı değerinin -2'den küçük olması, dengeden uzaklaşıldığını göstermektedir. (Alam ve Quazi, 2003:97). Buna göre, incelenen modelde dengeden sapmalar uzun dönemde de devam etmektedir. Kısa dönemde, nükleer enerjide meydana gelen pozitif bir şokun karbon ayak izi üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmazken, %1'lik negatif bir şok karbon ayak izini %1.457 oranında azaltmaktadır. Yenilenebilir enerjide meydana gelen %1'lik pozitif bir şok karbon ayak izini %0.533 oranında azaltırken, %1'lik negatif bir şok karbon ayak izini %0.330 oranında azaltmaktadır. Enerji ar-ge harcamalarında meydana gelen %1'lik pozitif bir şok ise karbon ayak izini %0.102 oranında artırırken, %1'lik negatif bir şok ise karbon ayak izini %0.067 oranında azaltmaktadır.

Özetlemek gerekirse, doğrusal ARDL yaklaşımı bulguları uzun dönemde nükleer enerji, yenilenebilir enerji ve enerji ar-ge harcamalarının ABD'nde karbon ayak izini azalttığını; asimetrik NARDL bulguları ise, enerji ar-ge harcamalarında meydana gelen pozitif şoklar hariç tüm değişkenlerdeki pozitif ve negatif şokların ülkenin karbon ayak izini azalttığını doğrulamaktadır. Kısa dönemde ise ARDL bulguları, nükleer enerji ve yenilenebilir enerjinin karbon ayak izini azalttığını; NARDL bulguları ise, yalnızca enerji ar-ge'deki pozitif şokların karbon ayak izini artırdığını diğer tüm değişkenlerdeki pozitif ve negatif şokların ise ülkenin karbon ayak izini azalttığını göstermektedir. Kısa ve uzun vadeli bu ampirik bulgular, ABD için yapılan çalışmalardan Baek (2016), Lee vd. (2017), Fernandez vd. (2018), Bilgili vd. (2021), Usman ve Radulescu (2022) ve Kartal vd. (2023)'ün çalışmalarının bulgularıyla benzerlik taşımaktadır.

Nükleer enerjinin karbon emisyonlarından büyük ölçüde arınmış olduğu gerçeği göz önüne alındığında, geleneksel yenilenemeyen enerji tabanlı güç ünitelerinin nükleer güç üniteleriyle yeniden devreye alınması, çevresel bozulmayı büyük ölçüde azaltmaya yardımcı olabilir (Usman ve Radulescu, 2022:9). Dolayısıyla nükleer enerji açısından ulaşılan bulgular, mevcut bu durumun ABD ekonomisi açısından ampirik olarak doğrulandığını göstermektedir. Yenilenebilir enerji açısından ulaşılan bulgular, ABD'nin Çin'den sonra dünyanın en büyük ikinci CO₂ emisyonu yayıcısı olarak sıralandığı göz önüne alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekli kullanımının uzun vadede ülkenin karbon ayak izi seviyesinde önemli bir

azalmaya neden olduğunu ve gelecek dönemde de emisyonları büyük ölçüde baskılayabileceğini göstermektedir. Ek olarak enerji teknolojisindeki ar-ge harcamalarının ülkenin karbon ayak izini azaltmada etkili olması ABD'nin temiz enerji teknolojilerinin teşvik edilmesi yoluyla sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada doğru yolda olduğunu göstermektedir. Dahası bu bulgular, ABD'nin geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla karbon ayak izini azaltmada daha fazla güce sahip nükleer ve yenilenebilir enerji gibi daha temiz enerji kaynaklarına doğru bir geçiş sürecinde olduğunu ve enerji alanındaki ar-ge faaliyetlerini bu yönde geliştirdiğini ortaya koymaktadır.

4. Sonuç

Çevreye zarar vermeden ekonomik büyümenin garantilenmesi diğer bir ifadeyle ekonomik büyümenin sürdürülebilirliğinin sağlanması pek çok ekonomi açısından kritik bir hedef haline gelmiştir. Bu hedefe ulaşmak için ülkeler, düşük veya sıfır karbonlu temiz enerjiye geçiş çabası içine girmektedirler. Yenilenebilir ve nükleer enerjiler, karbon emisyonlarının azaltılmasına büyük ölçüde katkıda bulunan ve gelecekte daha fazla katkıda bulunma potansiyeli bulunan temiz enerji kaynaklarının bir parçasıdır. Kirli enerji kaynaklarından temiz enerji kaynaklarına doğru dönüşümü teşvik etmede ise enerji ar-ge harcamaları ve buna yönelik ayrılan kamu bütçelerinin büyük bir rolü bulunmaktadır. Bu nedenle temiz enerji, enerji ar-ge harcamaları ve çevresel bozulma arasında araştırılması gereken dinamik bir bağlantı bulunmaktadır. Bu motivasyondan hareketle bu çalışmada, söz konusu ilişki dünyada hem temiz enerji üretimi ve tüketiminde lider konumu nedeniyle hem de dünyanın en büyük kirletici yayan ikinci ekonomisi olması nedeniyle ABD ekonomisi için incelenmektedir. Böylelikle çalışmada, 1974-2023 döneminde ABD'nde nükleer enerji, yenilenebilir enerji ve enerji ar-ge harcamalarının ülkenin karbon ayak izi üzerindeki rolü hem simetrik hem de asimetrik etkileri dikkate alan ARDL ve NARDL yaklaşımları ile analiz edilmiştir. Ampirik bulguları şu şekilde özetlemek mümkündür: (i) Her iki yaklaşım bulgularına göre değişkenler arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisi söz konusudur. (ii) Doğrusal ARDL yaklaşımı bulguları; kısa dönemde nükleer enerji ve yenilenebilir enerjinin, uzun dönemde ise nükleer enerji, yenilenebilir enerji ve enerji ar-ge harcamalarının ülkenin karbon ayak izini azalttığını göstermektedir. (iii) Asimetrik NARDL bulgularına göre, kısa dönemde nükleer enerjideki pozitif şokların karbon ayak izi üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmazken yalnızca enerji ar-ge'deki pozitif şoklar karbon ayak izini artırmakta, diğer tüm değişkenlerdeki pozitif ve negatif şoklar ülkenin karbon ayak izini azaltmaktadır. Uzun dönemde ise enerji ar-

ge harcamalarında meydana gelen pozitif şoklar hariç tüm değişkenlerdeki pozitif ve negatif şoklar ülkenin karbon ayak izini azaltmaktadır.

Ulaşılan bu bulgular ülkenin enerji politikası açısından bazı çıkarımları ortaya koymaktadır. İlk olarak, ülkede nükleer enerji kullanımı çevresel bozulmayı önemli ölçüde azaltmaya yardımcı olmaktadır. Bu bulgu, ABD ekonomisi açısından çevre üzerindeki baskıyı azaltarak ekonomik büyümenin teşvik edilmesinde nükleer enerjinin fosil yakıtlara iyi bir alternatif olabileceğini göstermektedir. Ancak fisyonu dayalı nükleer üretim teknolojisi sağlık, çevre ve güvenlik açısından birtakım riskler barındırmaktadır. Bu nedenle ülkede, sürdürülebilir ve düşük karbonlu bir ekonomi için nükleer enerji yakın gelecekte fosil yakıtların yerini alacaksa enerji güvenliği konusundaki bütün risklerin kontrol altına alındığından emin olunmalıdır. Güvenlik boyutu kontrol altına alındığında ABD'nin 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşması açısından nükleer enerjinin enerji bileşimindeki payının artırılması stratejik bir hamle olabilir. Bu bağlamda; nükleer enerji teknolojilerine yönelik ar-ge faaliyetlerinin hızlandırılması, nükleer enerji santrali kurulumuna yönelik düşük faizli kredi ve nükleer kaynaklı üretilen enerjiye satın alma garantisi gibi bazı sübvansiyonlar verilmesi ve özellikle kamu-özel sektör ortaklığıyla nükleer enerji yatırımlarındaki artışın desteklenmesi uygulanması gereken öncelikli politikalar arasında değerlendirilebilir.

İkinci olarak yenilenebilir enerji açısından ulaşılan ampirik bulgular, yenilenebilir enerji kullanımının ülkenin karbon nötrlüğünün teşvik edilmesini desteklediğine işaret etmektedir. Dolayısıyla ABD'nde sürdürülebilir çevre dostu ekonomik genişlemeyi başarmak için, yenilenebilir enerji dönüşümünün sağlanması gerekliliği açıkça görülmektedir. Ülkede nükleer enerjiye kıyasla yenilenebilir enerjinin uzun dönemde karbon ayak izini azaltmadaki etkisi görece daha yüksektir. Ancak bu bulgu, nükleer enerji ve yenilenebilir enerjinin birbirine alternatif olduğu anlamına gelmemektedir. Aksine bu iki temiz enerji kaynağı birbirini tamamlayarak kirli fosil yakıtlara alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda karbon nötrlüğü ve çevresel iyileşmenin sürdürülebilirliği için ABD ekonomisi açısından en iyi seçenek nükleer ve yenilenebilir enerjinin bir karışımını hedeflemektir. Bu nedenle, ekonomik büyüme-çevresel bozulma dengesinde yenilenebilir enerji ve nükleer enerji üretiminin birlikte artırılması daha kapsamlı bir çözüm olarak görülmektedir. Bu kapsamda nükleer enerjide olduğu gibi yenilenebilir enerjinin de kullanımını artıracak birtakım önlemler uygulamaya konulmalıdır. Bunlar arasında; yenilenebilir enerjinin yaygın kullanımını teşvik etmek için hükümetin yenilenebilir enerjiyle bağlantılı mal ve hizmetler için sübvansiyon sağlaması, yenilenebilir enerji teknolojilerinin

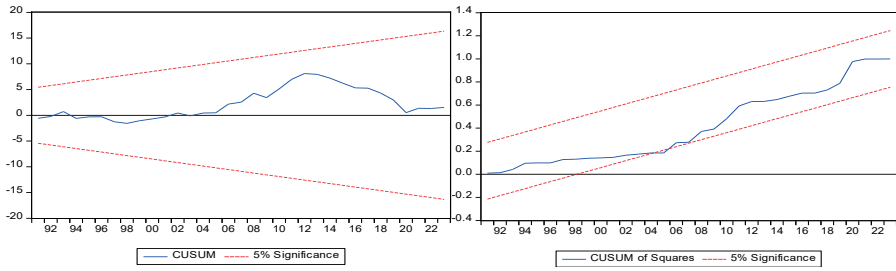
gelişimine öncelik verilmesi ve politika yapımcıların işletmelerin/bireylerin fosil yakıt enerjisini yenilenebilir enerjiyle değiştirmesini kolaylaştırmak için ücretler ve yenilenebilir enerji maliyetleriyle ilgili birtakım düzenlemeleri hayata geçirmesi sayılabilir.

Son olarak, kamu enerji ar-ge harcamaları ABD ekonomisinde çevresel bozulmayı azaltmaya katkıda bulunan önemli bir faktördür. Çünkü, ar-ge harcamalarının artmasıyla daha fazla yüksek teknoloji üretilmesi çevresel bozulmanın en önemli dinamiklerinden biri olan enerji yoğunluğunun azaltılmasına neden olmaktadır. Bu sebeple ülkede temiz enerji dönüşümünün sağlanmasında ar-ge bütçelerinin payı daha fazla dikkate alınmalıdır. Bu bağlamda; enerji ar-ge harcamalarında kamu bütçesinin artırılması ve özel sektör kanalıyla yeni finansman tekniklerinin bulunması, yenilenebilir enerji projelerindeki riskleri dengelemek için kamu-özel işbirliklerinin teşvik edilmesi, yenilenebilir enerjiler üzerinde ar-ge yapmaya istekli kuruluşlar için faizsiz krediler ve vergi teşvikleri sağlanması, enerji ar-ge harcamaları bileşenleri içerisinde fosil yakıtlar yerine nükleer ve yenilenebilir gibi temiz enerjiye ayrılan payların yükseltilmesi gibi bir takım politikalar ön plana çıkarılmalıdır.

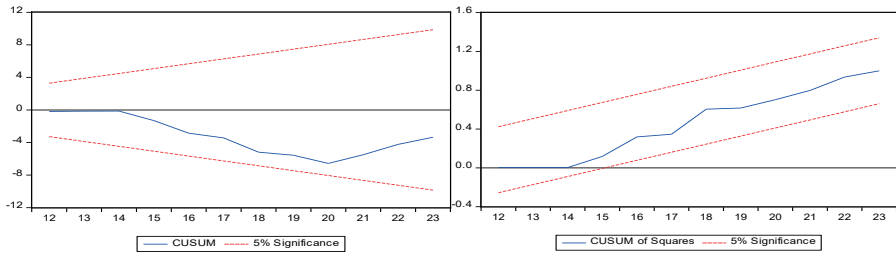
Özetle, nükleer ve yenilenebilir enerjinin rolüyle ilgili olarak bu çalışmanın bulguları söz konusu temiz enerji kaynaklarının uzun vadeli çevre politikalarında ve artan enerji taleplerini karşılamada çevre-büyüme ilişkisini tehlikeye atmadan temiz enerji kaynakları olarak kullanılabilceği argümanını desteklemektedir. Temiz enerji geçişinin sağlanmasında öncü rol ise enerji ar-ge'sinin geliştirilmesine düşmektedir. Bu sebeple ABD ekonomisi açısından geçerliliği kanıtlanan temiz enerji-enerji ar-ge-çevresel iyileşme bağlantısı pek çok ekonomi açısından dikkate alınması gereken bulguları ve politika önerilerini ortaya koymaktadır. Mevcut bulgular ve politika önerileri, yalnızca ABD ekonomisi için değil aynı zamanda pek çok ülke açısından sürdürülebilir kalkınma hedeflerinden SDG-7 (uygun fiyatlı ve temiz enerji) ve SDG-13 (iklim eylemi) hedeflerine ulaşmaya yardımcı olabilir.

Ek olarak, bu çalışma küresel çevresel bozulmaya katkısı ve temiz enerji kullanımındaki öncü rolü nedeniyle sadece ABD ekonomisini odaklanmaktadır. Ancak gelecekteki araştırmaların yüksek miktarda temiz enerji tüketen birçok ülkeyi kapsamı, fosil yakıtların (kömür, petrol ve doğalgaz) analize dâhil edilmesi, enerji ar-ge harcamalarının ayrıştırılarak (yenilenebilir enerji, fosil yakıtlar, nükleer enerji ve enerji verimliliği gibi) her birinin ülkelerin çevresel performansları üzerindeki etkisinin ayrıntılı olarak incelenmesi mevcut çevre ekonomisi literatürünü daha fazla genişletebilir.

Ek 1. ARDL(2,3,2,3) Modeli CUSUM ve CUSUM-Q Grafikleri

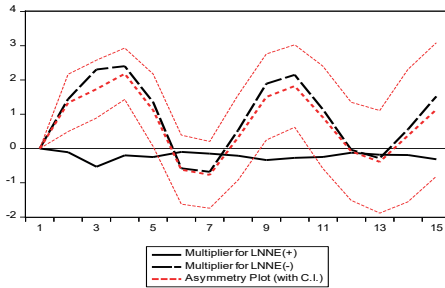


Ek 2. NARDL(4,3,4,3,4,4) Modeli CUSUM ve CUSUM-Q Grafikleri

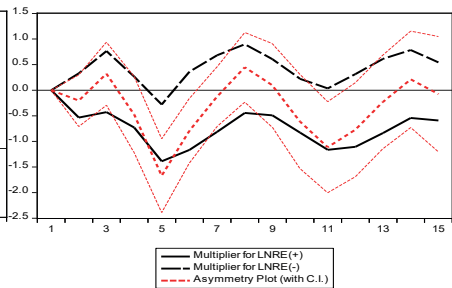


Ek 3. Nükleer Enerji (a), Yenilenebilir Enerji (b) ve Enerji Ar-Ge Harcamalarının (c) Karbon Ayak İzi Üzerindeki Kümülatif Etkileri

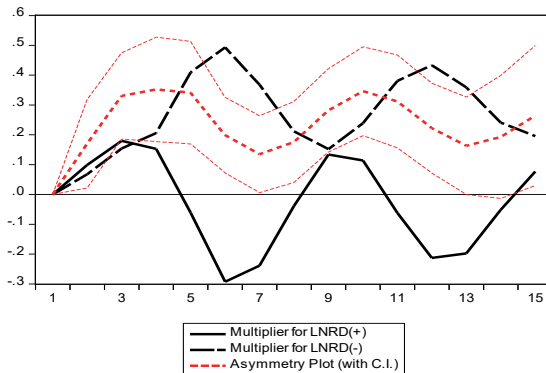
(a)



(b)



(c)



Kaynakça

- Alam, I., & Quazi, R. (2003). Determinants of capital flight: An econometric case study of Bangladesh. *International Review of Applied Economics*, 17(1), 85-103. <https://doi.org/10.1080/713673164>
- Al-Mulali, U. (2014). Investigating the impact of nuclear energy consumption on GDP growth and CO₂ emission: A panel data analysis. *Progress in Nuclear Energy*, 73, 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.02.002>
- Álvarez-Herránz, A., Balsalobre, D., Cantos, J. M., & Shahbaz, M. (2017). Energy innovations-GHG emissions nexus: fresh empirical evidence from OECD countries. *Energy Policy*, 101, 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.030>
- Apergis, N., Payne, J. E., Menyah, K., & Wolde-Rufael, Y. (2010). On the causal dynamics between emissions, nuclear energy, renewable energy, and economic growth. *Ecological Economics*, 69(11), 2255-2260. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.06.014>
- Baek, J. (2016). Do nuclear and renewable energy improve the environment? Empirical evidence from the United States. *Ecological Indicators*, 66, 352-356. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.059>
- Balsalobre, D., Álvarez, A., & Cantos, J. M. (2015). Public budgets for energy RD&D and the effects on energy intensity and pollution levels. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 4881-4892. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3121-3>
- Banerjee, A., Dolado, J. & Mestre, R. (1998). Error-correction mechanism tests for cointegration in a single-equation framework. *Journal of Time Series Analysis*, 19(3), 267-283. <https://doi.org/10.1111/1467-9892.00091>
- Bilgili, F., Nathaniel, S. P., Kuşkaya, S., & Kassouri, Y. (2021). Environmental pollution and energy research and development: an Environmental Kuznets Curve model through quantile simulation approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(38), 53712-53727. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14506-0>
- Böyük, G., & Mert, M. (2014). Fossil & renewable energy consumption, GHGs (greenhouse gases) and economic growth: Evidence from a panel of EU (European Union) countries. *Energy*, 74, 439-446. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.008>
- Bulut, U. (2017). The impacts of non-renewable and renewable energy on CO₂ emissions in Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 15416-15426. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9175-2>
- Cheng, Z., Li, L., & Liu, J. (2017). The emissions reduction effect and technical progress effect of environmental regulation policy tools. *Journal of Cleaner Production*, 149, 191-205. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.105>

- Climate Policy Lab. (2024). Global Public Energy RD&D Expenditures Database. <https://www.climatepolicylab.org/rddmap>
- Çakar, N. D., Erdoğan, S., Gedikli, A., & Öncü, M. A. (2022). Nuclear energy consumption, nuclear fusion reactors and environmental quality: The case of G7 countries. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(4), 1301-1311. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.10.015>
- Dincer, I. (2000). Renewable energy and sustainable development: A crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 157-175. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00011-8)
- 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>
- Farhani, S., & Shahbaz, M. (2014). What role of renewable and non-renewable electricity consumption and output is needed to initially mitigate CO₂ emissions in MENA region?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.170>
- Fernández, Y. F., López, M. F., & Blanco, B. O. (2018). Innovation for sustainability: the impact of R&D spending on CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3459-3467. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.001>
- Garrone, P., & Grilli, L. (2010). Is there a relationship between public expenditures in energy R&D and carbon emissions per GDP? An empirical investigation. *Energy Policy*, 38(10), 5600-5613. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.04.057>
- Global Footprint Network. (2024). <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>
- Goldemberg, J. (2006). The promise of clean energy. *Energy Policy*, 34(15), 2185-2190.
- Gu, W., Zhao, X., Yan, X., Wang, C., & Li, Q. (2019). Energy technological progress, energy consumption, and CO₂ emissions: empirical evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117666. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117666>
- Hassan, S. T., Baloch, M. A., & Tarar, Z. H. (2020). Is nuclear energy a better alternative for mitigating CO₂ emissions in BRICS countries? An empirical analysis. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(12), 2969-2974. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.05.016>
- International Energy Agency [IEA]. (2019). Nuclear Power in a Clean Energy System. International Energy Agency 2019 Report. <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>

- International Energy Agency. (2020). Energy Technology RD&D Budgets: Overview. Statistics Report. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-rdd-budgets-2020>
- International Energy Agency. (2024). Energy Technology RD&D Budgets. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-technology-rd-and-d-budget-database-2>
- International Renewable Energy Agency [IRENA] (2019). Global Energy Transformation. A Roadmap to 2050. <https://www.irena.org/>
- Jaiswal, K. K., Chowdhury, C. R., Yadav, D., Verma, R., Dutta, S., Jaiswal, K. S., & Karuppasamy, K. S. K. (2022). Renewable and sustainable clean energy development and impact on social, economic, and environmental health. *Energy Nexus*, 7, 100118. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100118>
- Jin, L., Duan, K., Shi, C., & Ju, X. (2017). The impact of technological progress in the energy sector on carbon emissions: an empirical analysis from China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1505. <https://doi.org/10.3390/ijerph14121505>
- Kartal, M. T., Samour, A., Adebayo, T. S., & Depren, S. K. (2023). Do nuclear energy and renewable energy surge environmental quality in the United States? New insights from novel bootstrap Fourier Granger causality in quantiles approach. *Progress in Nuclear Energy*, 155, 104509. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104509>
- Kassouri, Y. (2022). Fiscal decentralization and public budgets for energy RD&D: A race to the bottom?. *Energy Policy*, 161, 112761. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112761>
- Khan, I., Han, L., BiBi, R., & Khan, H. (2022). The role of technological innovations and renewable energy consumption in reducing environmental degradation: evidence from the belt and road initiative countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(48), 73085-73099. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21006-2>
- Koçak, E., & Ulucak, Z. Ş. (2019). The effect of energy R&D expenditures on CO₂ emission reduction: estimation of the STIRPAT model for OECD countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 14328-14338. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04712-2>
- 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>
- Lee, S., Kim, M., & Lee, J. (2017). Analyzing the impact of nuclear power on CO₂ emissions. *Sustainability*, 9(8), 1428. <https://doi.org/10.3390/su9081428>

- Li, L., McMurray, A., Li, X., Gao, Y., & Xue, J. (2021). The diminishing marginal effect of R&D input and carbon emission mitigation. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124423. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124423>
- 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>
- 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>
- Mourshed, M., & Quddus, M. A. (2009). Renewable energy RD&D expenditure and CO₂ emissions in 15 European countries. *International Journal of Energy Sector Management*, 3(2), 187-202. <https://doi.org/10.1108/17506220910970588>
- Murshed, M., Saboori, B., Madaleno, M., Wang, H., & Doğan, B. (2022). Exploring the nexuses between nuclear energy, renewable energy, and carbon dioxide emissions: the role of economic complexity in the G7 countries. *Renewable Energy*, 190, 664-674. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.121>
- Narayan, P.K. (2005). The saving and investment nexus for China: Evidence from cointegration tests. *Applied Economics*, 37(17), 1979-1990. <https://doi.org/10.1080/00036840500278103>
- Nathaniel, S. P., Alam, M. S., Murshed, M., Mahmood, H., & Ahmad, P. (2021). The roles of nuclear energy, renewable energy, and economic growth in the abatement of carbon dioxide emissions in the G7 countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(35), 47957-47972. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13728-6>
- Our World in Data. (2024). United States: Energy Country Profile. <https://ourworldindata.org/energy/country/united-states>
- Pata, U. K., & Kartal, M. T. (2023). Impact of nuclear and renewable energy sources on environment quality: Testing the EKC and LCC hypotheses for South Korea. *Nuclear Engineering and Technology*, 55(2), 587-594. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.10.027>
- Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. J. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, 16(3), 289-326. <https://doi.org/10.1002/jae.616>
- Sadekin, S., Zaman, S., Mahfuz, M., & Sarkar, R. (2019). Nuclear power as foundation of a clean energy future: A review. *Energy Procedia*, 160, 513-518. [10.1016/j.egypro.2019.02.200](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.200)

- 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>
- Saqib, N. (2022). Asymmetric linkages between renewable energy, technological innovation, and carbon-dioxide emission in developed economies: non-linear ARDL analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(40), 60744-60758. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20206-0>
- Shin, Y., Yu, B. & Greenwood-Nimmo, M. (2014). *Modelling asymmetric cointegration and dynamic multipliers in a nonlinear ARDL framework*. In Festschrift in honor of Peter Schmidt (pp. 281-314). New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-8008-3_9
- Sims, R. E., Rogner, H. H., & Gregory, K. (2003). Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation. *Energy Policy*, 31(13), 1315-1326. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00192-1](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00192-1)
- Statista (2024). Distribution of carbon dioxide emissions worldwide in 2023, by select country. <https://www.statista.com/markets/408/energy-environment/>
- Suki, N. M., Suki, N. M., Sharif, A., Afshan, S., & Jermsittiparsert, K. (2022). The role of technology innovation and renewable energy in reducing environmental degradation in Malaysia: a step towards sustainable environment. *Renewable Energy*, 182, 245-253. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.007>
- Trinh, H.H. (2023). Energy technology RD&D budgets, environmental sustainability, and energy transition: A review of emerging trends, policies, and pathways. in: Fathi, M., Zio, E., Pardalos, P.M. (eds) *Handbook of Smart Energy Systems*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72322-4_186-1
- United Nations. (2015). Paris Agreement. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- United Nations. (2024). Department of Economic and Social Affairs. Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/goals>
- Usman, M., & Hammar, N. (2021). Dynamic relationship between technological innovations, financial development, renewable energy, and ecological footprint: fresh insights based on the STIRPAT model for Asia Pacific Economic Cooperation countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 15519-15536. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11640-z>
- Usman, M., & Radulescu, M. (2022). Examining the role of nuclear and renewable energy in reducing carbon footprint: does the role of technological innovation really create some difference?. *Science of The Total Environment*, 841, 156662. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156662>

- Usman, M., Jahanger, A., Radulescu, M., & Balsalobre-Lorente, D. (2022). Do nuclear energy, renewable energy, and environmental-related technologies asymmetrically reduce ecological footprint? Evidence from Pakistan. *Energies*, *15*(9), 3448. <https://doi.org/10.3390/en15093448>
- Vo, D. H., Vo, A. T., Ho, C. M., & Nguyen, H. M. (2020). The role of renewable energy, alternative and nuclear energy in mitigating carbon emissions in the CPTPP countries. *Renewable Energy*, *161*, 278-292. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.093>
- World Economic Forum. (2023). How much are governments spending on clean energy? Here's the top-5 list. <https://www.weforum.org/>
- Xue, C., Shahbaz, M., Ahmed, Z., Ahmad, M., & Sinha, A. (2022). Clean energy consumption, economic growth, and environmental sustainability: what is the role of economic policy uncertainty?. *Renewable Energy*, *184*, 899-907. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.006>
- Yue, X., Peng, M. Y. P., Anser, M. K., Nassani, A. A., Haffar, M., & Zaman, K. (2022). The role of carbon taxes, clean fuels, and renewable energy in promoting sustainable development: How green is nuclear energy?. *Renewable Energy*, *193*, 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.017>
- Zhao, J., Sinha, A., Inuwa, N., Wang, Y., Murshed, M., & Abbasi, K. R. (2022). Does structural transformation in economy impact inequality in renewable energy productivity? Implications for sustainable development. *Renewable Energy*, *189*, 853-864. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.050>