



The Effect of Environmental Innovation and R&D Expenditures on Low Carbon Energy Consumption in Türkiye

Tunahan Değirmenci^{1,a,*}, Mehmet Aydın^{2,b}

¹Department of Public Finance, Faculty of Political Sciences, Sakarya University, Sakarya, Türkiye

²Department of Econometrics, Faculty of Political Sciences, Sakarya University, Sakarya, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 27/10/2023

Accepted: 28/02/2024

JEL Codes: K32, P18, C01

ABSTRACT

The need for energy is increasing due to urbanization and population growth worldwide. Relying mainly on fossil fuels for energy is inadequate to fulfill energy demands and exacerbates environmental pollution. For this reason, countries are seeking to accelerate the transition to nuclear and renewable energy, which are low-carbon energy. The transition to low-carbon energy increases energy supply while reducing environmental pressure. The development of clean technologies in the field of energy and environment can be achieved through R&D activities and innovation. In this study, the impact of environmental innovation and R&D expenditures on low-carbon energy (nuclear and renewable energy) consumption in Türkiye for the period 1993-2019 is investigated with Fourier ADL cointegration and Fourier Toda-Yamamoto Causality tests. According to the research results, there is no long-run relationship between the variables examined. On the other hand, there is a unidirectional causality relationship from environmental innovation to low-carbon energy consumption and from R&D expenditures to low-carbon energy consumption. The finding of a causal relationship between public R&D expenditures and environmental innovation towards low-carbon energy reveals that it supports the multifaceted potential effects of R&D expenditures and environmental innovation. In order to ensure the transition to low-carbon energy in Türkiye, importance should be given to environmental innovation, which is a cumulative process, and to R&D expenditures that will help this. In this context, the implementation of public policies supported by tax and expenditure policies such as tax reductions, tax exemptions, and subsidies that will encourage R&D activities and environmental innovation can be effective.

Keywords: Renewable energy, Innovation, R&D expenditures, Fourier Toda-Yamamoto

Türkiye’de Çevresel İnovasyon ve Ar-Ge Harcamalarının Düşük Karbonlu Enerji Tüketimine Etkisi

Süreç

Geliş: 27/10/2023

Kabul: 28/02/2024

Jel Kodları: K32, P18, C01

Öz

Dünya çapında kentleşme ve nüfus artışına bağlı olarak enerjiye olan ihtiyaç artmaktadır. İhtiyaç duyulan enerjinin büyük bir kısmının fosil yakıtlardan sağlanması, enerji talebini karşılamada yetersiz kalmakta ve çevre kirliliğini arttırmaktadır. Bu nedenle ülkeler düşük karbonlu enerji olan nükleer ve yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırmak için arayış içindedirler. Düşük karbonlu enerjiye geçiş, çevresel baskıyı azaltırken enerji arzını artırmaktadır. Enerji ve çevre alanında temiz teknolojilerin geliştirilmesi Ar-Ge faaliyetleri ve inovasyonla gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada 1993-2019 dönemi için Türkiye’de çevresel inovasyon ve ar-ge harcamalarının düşük karbonlu enerji (nükleer ve yenilenebilir enerji) tüketimi üzerindeki etkisi Fourier ADL eşbütünleşme ve Fourier Toda-Yamamoto Nedensellik testleri ile araştırılmaktadır. Araştırma sonuçlarına göre incelenen değişkenler arasında uzun dönemli bir ilişki bulunmamaktadır. Öte yandan çevresel inovasyondan düşük karbonlu enerji tüketimine ve Ar-Ge harcamalarından düşük karbonlu enerji tüketimine doğru tek yönlü nedensellik ilişkisi bulunmaktadır. Kamu Ar-Ge harcamaları ve çevresel inovasyondan düşük karbonlu enerjiye yönelik nedensellik ilişkisinin bulunması, Ar-Ge harcamaları ve çevresel inovasyonun çok yönlü potansiyel etkilerini destekler nitelikte olduğunu ortaya koymaktadır. Türkiye’de düşük karbonlu enerjiye geçişin sağlanabilmesi için kümülatif bir süreç olan çevresel inovasyona ve buna yardımcı olacak Ar-Ge harcamalarına önem verilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda Ar-Ge faaliyetleri ve çevresel inovasyonu teşvik edecek vergi indirimleri, vergi muafiyetleri ve sübvansiyonlar gibi vergi ve harcama politikalarıyla desteklenen kamu politikalarının uygulanması etkili olabilir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, İnavasyon, Ar-Ge harcamaları, Fourier Toda-Yamamoto

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution-
NonCommercial 4.0 International
License

^a tunahandegirmenci@sakarya.edu.tr

^{ib} 0000-0002-8903-7883

^b mehmetaydin@sakarya.edu.tr

^{ib} 0000-0003-0780-1663

How to Cite: Değirmenci T, Aydın M (2024) The Effect of Environmental Innovation and R&D Expenditures on Low Carbon Energy Consumption in Türkiye, Journal of Economics and Administrative Sciences, 25(2): 239-250, DOI: 10.37880/cumuiibf.1382019

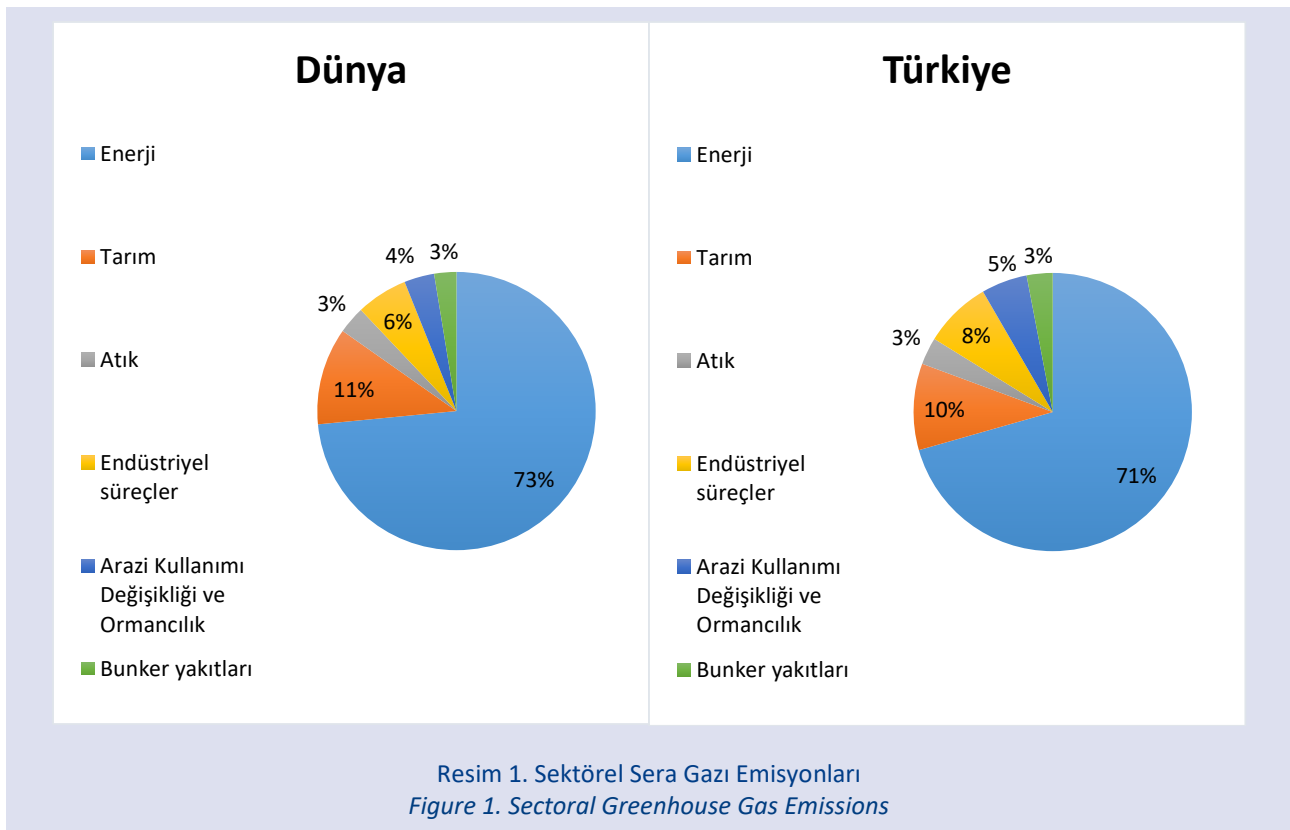
Giriş

Enerji ihtiyacının karşılanmasında fosil yakıtlar ucuz ve yaygın olması sebebiyle birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat fosil yakıtlar ciddi çevre sorunlarına sebep olduğundan günümüzde düşük karbonlu enerjiler olan nükleer enerji ve yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırmak amacıyla önemli adımlar atılmaktadır. Düşük karbonlu enerji geçişinin hızlandırılması birbiriyle bağlantılı olan iki temel faktöre dayandırılabilir. Birinci faktör enerji talebindeki artıştır. Başta kentleşme ve nüfus artışı sebebiyle enerji talebi giderek artmaktadır. Enerji talebindeki artış sonucu yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaç artmaktadır. Dünya çapında istikrarlı bir artış gösteren enerji talebi, pandemi döneminde bir miktar geri çekilmiştir. 2020 yılında enerji tüketimi yaklaşık %4,5 düşmüştür. Bu düşüş 2009 yılından bu yana ilk defa görülmüştür (BP, 2021). Fakat ülkeler pandemi döneminde yapılan sınırlandırmaları kaldırdıkça küresel enerji talebi %4 artarak pandemi öncesi seviyelerine çıkmıştır. Bu hareketlilikle beraber daha önce enerji üretimi için düşük karbonlu enerjilere yönelik yapılan yapısal değişikliklere yeniden önem verilmiştir. Yapısal değişikliklerle beraber ortaya çıkan enerji verimliliği bir birim küresel GSYİH üretmek için gereken enerji miktarını istikrarlı bir şekilde düşürmektedir (İEA, 2021). Bu bağlamda artan enerji talebinin, enerji verimliliğini sağlayacak yapısal değişikliklere sebep olduğu ve bunun

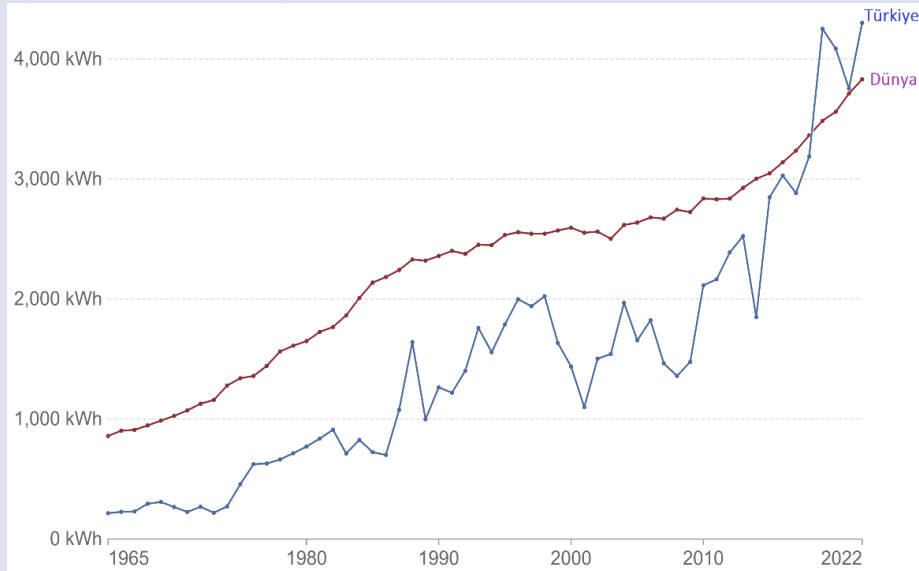
sonucunda düşük karbonlu enerji kullanımını artırdığı söylenebilir.

Düşük karbonlu enerji kullanımını etkileyen ikinci ve ana faktör çevre kirliliğidir. İklim değişikliği tehdidiyle mücadele edebilmek için tek ve en önemli araç, yenilenebilir enerjinin yaygınlaştırılmasıdır (BP, 2021). Çünkü fosil enerji kaynaklarının kullanımı, çevre kirliliği sonucu iklim değişikliği gibi temel sorunları ortaya çıkarmaktadır. Bu sorunlar neticesinde birçok kurum ve kuruluş çeşitli yaptırımlarla iklim değişikliğiyle mücadele etmektedir. Nitekim İskoçya'da gerçekleştirilen 26. İklim değişikliği konferansında gelecek yıl fosil yakıtların kullanımının azaltılması gerektiği belirtilmiştir. Fosil yakıt enerji kullanımının azaltılmadığı takdirde 34 ülke ve 5 kamu finans kurumu, fosil yakıt sektörüne yönelik yapılan yıllık yaklaşık 24 milyar \$ uluslararası desteği durduracaktır. Benzer şekilde küresel pazarın %30'undan fazlasını temsil eden araç üreticileri, fosil yakıtlı araçları 2 yıl içinde aşama aşama bırakacaklarını taahhüt etmişlerdir. Bununla birlikte özel ortaklıklar aracılığıyla 2 milyar dolarlık iklim yatırım fonları oluşturularak yenilenebilir enerji entegrasyon programları hızlandırılacaktır (UNFCCC, 2021).

Dünyada olduğu gibi Türkiye özelinde de kirliliğin büyük bir bölümü enerji kaynaklıdır. Nitekim 1990 yılında enerji kaynaklı emisyon diğer kaynaklardan oluşan emisyonlardan üç kat daha fazlayken, 2018 yılında bu fark sekiz kata çıkmıştır (OECD, 2021). Dünya'da ve Türkiye'de sektörlere göre sera gazı emisyonları Resim 1'de gösterilmektedir.



Kaynak: Climate Watch (2023)



Resim 2. Kişi Başına Düşen Düşük Karbonlu Enerji Tüketimi
Figure 2. Low Carbon Energy Consumption per Capita

Kaynak: Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

Düşük karbonlu enerjinin yaygınlaşması, çevre kalitesini artırarak iklim değişikliğiyle mücadeleye destek olabilir (Aydın ve Değirmenci, 2021). Özellikle Türkiye'nin de taraf olduğu 1997 Kyoto Protokolüyle çevre sorunlarının azaltılması ve kontrol altına alınması için temiz enerji kaynaklarına geçiş hızlandırılmıştır (Değirmenci ve Yavuz, 2021). Resim 2'de Dünya'da ve Türkiye'de düşük karbonlu enerji tüketimi gösterilmektedir.

Bu kapsamda Türkiye'de yenilenebilir enerjinin yaygınlaşması için resmi olarak 2005 yılında Yenilenebilir Enerji Kanunu çıkarılmıştır. İzleyen dönemde Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı (YEPP) ve Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı gibi eylem planları yürürlüğe girmiştir. YEPP ile birlikte 2023 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji tüketimindeki payının en az %20'ye yükseltilmesi amaçlanmaktadır (YEPP, 2014). Fakat Uluslararası Enerji Ajansı (İEA) verilerine göre 2019 yılında Türkiye enerji üretiminin yaklaşık %54,1'ini yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlarken, aynı yılda yenilenebilir enerji tüketiminin toplam enerji tüketimi içindeki payının yaklaşık %5,1 olduğu görülmektedir (İEA, 2021). Bu veriler doğrultusunda değerlendirildiğinde yenilenebilir enerji tüketiminin YEPP'ndeki 2023 yılı amacına henüz ulaşmadığı görülmektedir.

Özetle, çevre kalitesini artırmak ve enerji talebini karşılamak için düşük karbonlu enerji kullanımı yaygınlaşmaktadır. Düşük karbonlu enerji kullanımını artırmak için ülkelerin uyguladığı birçok politika aracı bulunmaktadır (Değirmenci ve Aydın, 2023). Örneğin, yenilenebilir enerjiye yönelik muafiyet ve istisnalar, vergi kredileri, vergi tatili gibi vergi araçlarının yanı sıra, yatırım harcamaları, sermaye sübvansiyonları ve Ar-Ge harcamaları gibi harcama araçları da yaygın olarak kullanılmaktadır. Öte yandan ülkeler yenilenebilir enerjinin kullanımını artırmak amacıyla piyasaya yönelik tarife garantisi, prim garantisi ve kota yükümlülüğü gibi birçok uygulamayı yürürlüğe koymuştur (REN21, 2017). Bu araçlar içinde Ar-Ge harcamaları kümülatif bir süreç olması ve yayılma etkisiyle

(spillover effect) ön plana çıkmaktadır (Aydın vd., 2023a). Enerji ekonomisinin değişiminde Ar-Ge harcamaları önemli bir faktördür. Dünya genelinde her ülke, çevresel baskılar sonucu yeni enerji teknolojilerini geliştirmek için Ar-Ge harcamaları yapmaktadırlar (Jin ve Zhang, 2016; Aydın vd., 2023b). Düşük karbonlu enerjinin gelişimine yönelik yapılan Ar-Ge harcamaları enerji üretimi, tüketimi, depolanması ve taşınması süreçlerinde ortaya çıkan inovasyonla düşük karbonlu enerjiye geçişi doğrudan etkilemektedir. Öte yandan diğer sektörlerle yönelik yapılan Ar-Ge harcamaları yayılma etkisiyle birlikte düşük karbonlu enerji sektöründe inovasyonları beraberinde getirmektedir (İnal vd., 2022; Mamkezeri ve Khezri, 2023). Birbiriyle ilişkili olan Ar-Ge harcamaları ve inovasyonun düşük karbonlu enerji üzerindeki bu çok yönlü etkileri çalışmanın motivasyonunu oluşturmaktadır.

Bu çalışmada 1993-2019 dönemi için Türkiye'de çevresel inovasyon ve Ar-Ge harcamalarının düşük karbonlu enerji tüketimi üzerindeki etkisi Fourier ADL eşbütünleşme ve Fourier Toda-Yamamoto nedensellik analizi yöntemleriyle incelenmektedir. Literatürde Türkiye için genellikle düşük karbonlu enerjinin çevre kirliliği üzerindeki etkisinin incelendiği görülmektedir. Bununla birlikte, literatürde Türkiye'de çevre kalitesi üzerinde doğrudan etkisi bulunan düşük karbonlu enerjiyi etkileyen faktörlerin araştırıldığı az sayıda çalışma olduğunu dikkat çekmektedir. Bu doğrultuda, yazarın en iyi bilgisine göre bu çalışma Türkiye'de çevresel inovasyon ve Ar-Ge harcamalarının düşük karbonlu enerji tüketimi üzerindeki etkisini inceleyen az sayıda çalışmadan biri olarak ön plana çıkmaktadır. Ayrıca çalışmada, yumuşak geçişli yapısal kırılmaları dikkate alan birim kök, eşbütünleşme ve nedensellik testlerine yer verilerek literatüre katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde literatür araştırması, üçüncü bölümde veri, model ve metodoloji, dördüncü bölümde ampirik bulgular bulunmaktadır. Son bölüm olan beşinci bölüm ise sonuç ve değerlendirmeyi içermektedir.

Literatür Özeti

Enerjiye günümüzde hemen hemen tüm mal ve hizmetlerin üretiminde ihtiyaç duyulmaktadır. Buna karşın enerjinin kıt olması enerji talebinin fazla olmasına neden olmaktadır. Gelişmekte olan birçok ülke, büyüme tahminlerinden daha hızlı gelişmektedir. Bu hızlı gelişme enerji talebinde artışı beraberinde getirmektedir. Gelişmekte olan ülkelerin enerji tüketim oranı yüksektir (Godil vd., 2021). Enerji talebinin fosil yakıtlardan karşılanması çevre sorunlarına neden olmaktadır. Çevre sorunlarından dolayı enerji talebinin karşılanmasında düşük karbonlu enerjilere önem verilmektedir. Örneğin dünya genelinde DKE'nin yaygınlaşması amacıyla nükleer ve yenilenebilir enerji teknolojilerine Ar-Ge yatırımları yapılmaktadır. Ayrıca çevresel inovasyonlar sayesinde fosil yakıtların zararı minimize edilmektedir. Günümüzde yenilenebilir enerji tesislerinin kurulumunda dahi fosil yakıtlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte yenilenebilir enerji düşük de olsa çevreye tamamen duyarlı değildir. Bu bağlamda Ar-Ge yatırımları ve çevresel inovasyonlar yenilenebilir ve nükleer enerjinin daha temiz ve verimli olmasını sağlayabilir.

Düşük karbonlu enerji tüketimini etkileyen faktörler üzerinde yapılan araştırmalar son zamanlarda artış göstermiştir. Küreselleşme (Gozgor vd. 2020), finansal gelişme (Anton ve Nucu, 2020), çevresel inovasyon (Li vd. 2020), karbon emisyonu (Shafiei ve Salim, 2014), nüfus (Dong vd. 2018), kentleşme (Salim ve Shafiei, 2014), Ar-Ge harcamaları ve GSYİH (Kocsis ve Kiss, 2015)'nin enerji tüketimi üzerindeki etkilerine dair birçok araştırma bulunmaktadır.

Gan ve Smith (2011), çalışmalarında 1994-2003 yılı verilerini kullanarak OECD ülkeleri arasında kıyaslama yaparak DKE'nin itici güçlerini araştırmışlardır. Bu kapsamda ARG, enerji fiyatları Co2 emisyonları ve enerji politikalarının yenilenebilir enerji ve biyoenerji arzı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda incelenen dönemde ARG ve diğer faktörlerin yenilenebilir enerji arzında önemli bir rolü olmadığı tespit edilmiştir. Çalışmada, DKE teknolojileri uluslararası alanda kolayca aktarılabildiği için diğer ülkelerin tek tek Ar-Ge'ye yatırım yapma isteğini azaltabileceği belirtilmiştir. Öte yandan Kocsis ve Kiss (2015), çalışmalarında AB üye ülkeleri için 2004-2012 yılı verilerini kullanarak DKE kullanımı, ARG ve EB arasındaki ilişkiyi destek vektör regresyonu (SVR) yöntemiyle incelemişlerdir. Çalışma sonuçları, ARG ile yenilenebilir enerji tüketimi arasında pozitif bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ağpak ve Özçiçek (2018) ise 1998-2014 dönemi için 43 ülkede ARG ile DKE kullanımı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Sonuçlara göre, ülkelerin gelişmişlik düzeyi fark etmeksizin ARG ile DKE kullanımı arasında pozitif bir ilişki bulunmaktadır. Li vd. (2020), çalışmalarında 1990-2017 dönemi için OECD ülkelerinde çevresel İNV, enerji verimliliği, enerji fiyatları, beşerî sermaye ve gelirin DKE kullanımı üzerindeki etkisini CS-ARDL yöntemiyle araştırmışlardır. Çalışma sonuçları, çevresel İNV, enerji verimliliği ve enerji fiyatlarının DKE tüketimini artırdığını göstermektedir. Benzer şekilde

Wang vd. (2020), 1990-2017 dönemi için G20 ülkelerinde enerji verimliliği, petrol fiyatı, çevre baskısı, ARG ve politikaların DKE üretimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, enerji yoğunluğu, petrol fiyatı, ARG ve politikalar DKE'yi olumlu yönde etkilerken, çevre baskısı DKE'yi olumsuz yönde etkilemektedir.

Kılınç ve Kılınç (2021) ise 2003-2019 dönemi için 24 seçilmiş ülkede ARG ve İNV'nin DKE üretimi üzerindeki etkisini panel ARDL ve nedensellik testleriyle araştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, ARG ve İNV, DKE üretimini olumlu yönde etkilemektedir. Öte yandan dokuz ülkede ARG'den yenilenebilir enerji üretimine doğru, on ülkede ise İNV'den DKE üretimine doğru bir nedensellik ilişkisi bulunmuştur. Öte yandan Doğan ve Doğan (2021), çalışmalarında Türkiye'de 1968-2015 dönemi için finansal gelişim ve İNV'nin DKE üretimi üzerindeki etkisini ARDL Sınır Testi yaklaşımıyla incelemişlerdir. Çalışma sonuçları, finansal gelişim ve İNV'nin DKE üretimi üzerinde pozitif ve anlamlı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Çoban vd. (2021), 21 IEA üyesi için 2009-2019 yılı verilerini kullanarak İNV'nin DKE üretimi üzerindeki etkisini panel veri analiziyle incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, İNV DKE üretimini artırmaktadır. Assi vd. (2021), Çin, Japonya, Kore ve ASEAN ülkelerinde 1998-2018 yılı verilerini kullanarak yenilenebilir enerji tüketimi, finansal gelişme, çevre kirliliği ve inovasyon arasındaki ilişkiyi panel ARDL ve panel nedensellik testleriyle incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, çevre kirliliği ve ekonomik özgürlük ile DKE kullanımı arasında negatif, İNV ile DKE kullanımı arasında ise pozitif bir ilişki bulunmaktadır. Godil vd. (2021), Hindistan için finansal gelişme, ARG, küreselleşme ve kurumsal kalitenin enerji tüketimi üzerindeki etkisini 1995-2018 dönemindeki üç aylık verileri kullanarak QARDL yöntemiyle araştırmışlardır. Çalışma sonuçları, ARG ve kurumsal kalitenin enerji kullanımını negatif etkilediğini, küreselleşme ve finansal performansın ise enerji kullanımını pozitif etkilediğini göstermektedir. Benzer şekilde Churchill vd. (2021), çalışmalarında 1980-2014 dönemi için OECD ülkelerinde ARG'nin kişi başına enerji tüketimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, ARG toplam enerji tüketimi üzerinde zamanla değişen pozitif bir etkiye sahiptir. Öte yandan bulgulara göre ARG yenilenemeyen enerji tüketimi üzerinde pozitif etkiye sahipken, DKE tüketimi üzerinde negatif bir etki söz konusudur. Su vd. (2021), çalışmalarında 1990-2018 yılı verilerini kullanarak OECD ülkelerinde çevresel İNV, mali yerelleşme ve yenilenebilir ARG'nin DKE kullanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, mali yerelleşme, çevresel İNV, politik risk ve yenilenebilir enerji ARG, DKE tüketimini teşvik etmektedir. Akyol ve Mete (2022), çalışmalarında 2000-2018 yılı verilerini kullanarak çevresel İNV, EB ve doğrudan yabancı yatırımların DKE üzerindeki etkisini yükselen piyasa ekonomilerinden 10 ülke için araştırmışlardır. Çalışma sonuçları, çevresel İNV ve EB'nin DKE kullanımını negatif yönde etkilediğini göstermektedir. Ayrıca nedensellik testi sonuçlarına göre, çevresel İNV'dan

DKE kullanımına doğru bir nedensellik ilişkisi bulunmaktadır. Öte yandan Naimoğlu ve Özbek (2022), İngiltere için ARG ve enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi 1990-2018 dönemi verileriyle incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, uzun dönemde enerji kullanımının azaltılmasında en etkili olan harcama nükleer enerji için yapılan ARG'dir. Enerji kullanımını en fazla artıran harcama ise yenilenebilir enerjiye yönelik yapılan ARG'dir. Son olarak Li vd. (2023) 2000-2020 dönemi verilerini kullanarak Çin'de DKE'ye geçişi etkileyen faktörleri araştırmışlardır. Çalışma sonuçları, ARG, finansal gelişme ve insani gelişmenin DKE geçişine katkı sağladığını göstermektedir.

Literatürdeki çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde DKE kapsamında nükleer enerji ya da yenilenebilir enerji göstergesi ayrı ayrı kullanılmıştır. ARG ve İNV'nin DKE olan nükleer enerji ve yenilenebilir enerjiye etkisini inceleyen veya doğrudan nükleer enerjiye etkisini inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır.

Veri, Model ve Ekonometrik Metodoloji

Veri ve Model

Bu çalışmada, 1993-2019 döneminde Türkiye'de Ar-Ge harcamaları ve çevresel inovasyonun düşük karbonlu enerji tüketimi üzerindeki etkisi Fourier eşbütünleşme ve nedensellik testleri ile araştırılmaktadır. Çalışmada kullanılan değişkenlerin gösterge, ölçüm ve kaynaklarına ilişkin bilgiler Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çalışmada, Ar-Ge harcamaları verisi olarak Ar-Ge harcamalarının toplam harcamalar içindeki payı, çevresel inovasyon verisi olarak çevre ile ilgili patentlerin toplam patentler içindeki payı ve düşük karbonlu enerji tüketimi verisi olarak, kişi başına düşen nükleer ve yenilenebilir enerji tüketimi toplamı kilowatt saat (kWh) enerji miktarı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan değişkenlere ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve zaman grafikleri Çizelge 2 ve Resim 3'te sunulmuştur.

Çizelge 1. Değişken Tanımları

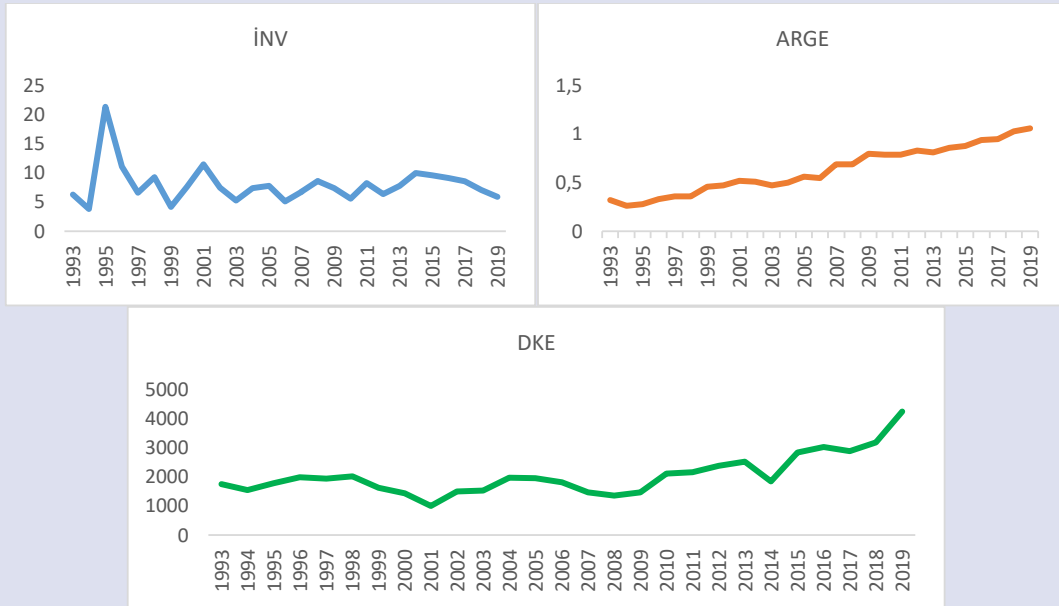
Table 1. Variable Definitions

Değişken	Gösterge	Ölçüm	Kaynak
Ar-Ge Harcamaları	ARG	GSYH içindeki pay (%)	OECD Data
Çevresel İnovasyon	İNV	Patentler içindeki pay (%)	OECD Data
Düşük Karbonlu Enerji Tüketimi	DKE	Kişi başına yenilenebilir ve nükleer enerji tüketimi (kWh)	Our World in Data

Çizelge 2. Değişkenlere İlişkin Tanımlayıcı İstatistikler

Table 2. Descriptive Statistics for Variables

	ARG	İNV	DKE
Ortalama	0,632	8,003	2054,926
Medyan	0,560	7,500	1940,000
Maksimum	1,060	21,40	4252,000
Minimum	0,260	3,800	1010,000
Standart Sapma	0,243	3,284	697,3399



Resim 3. Değişkenlere İlişkin Zaman Grafikleri
Figure 3. Time Graphs for Variables

Resim 3'te ARG değişkeninin artan bir trend izlediği, İNV ve DKE değişkenlerinin ise düzenli bir trend izlemedikleri, yıllar boyunca dalgalanmalar sergiledikleri dikkat çekmektedir. Değişkenlere ilişkin tanımlayıcı istatistikler incelendiğinde ise DKE'nin en yüksek ortalama değerine sahip olduğu ve onu sırasıyla İNV ve ARG değişkenlerinin takip ettiği görülmektedir. Standart sapma değerleri, en yüksek oynaklığa DKE'nin, en düşük oynaklığa ise ARG'nin sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kapsamda çalışmada, DKE değişkeninin oynaklığı azaltmak ve diğer değişkenlere sayısal olarak daha yakın hale getirmek için logaritmik formu kullanılmıştır. Diğer değişkenler yüzde değerleri ile hesaplandığı için düzey halleri ile ele alınmış ve DKE ile ARG ve İNV arasındaki uzun dönemli ilişki aşağıdaki yarı logaritmik model üzerinden araştırılmıştır:

$$\text{Model: } \ln DKE_t : \pi_0 + \pi_1 ARG_t + \pi_2 \dot{I}NV_t + u_t \quad (1)$$

Burada, π_0 sabit terim olmak üzere, π_1 ve π_2 uzun dönem katsayılarını temsil etmektedir. Çalışmada ayrıca, DKE değişkeni ile ARG ve İNV değişkenleri arasındaki nedensellik ilişkileri araştırılarak değişkenler arasındaki kısa vadedeki dinamik ilişkilerin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

Ekonometrik Metodoloji

Fourier ADF birim kök testi

Zaman serisi verileri ile çalışıldığında incelenen seriler, zaman boyunca farklı koşullara maruz kalabilmekte ve bu durum yapısal değişimlere neden olabilmektedir. Krizler, doğal afetler, politika değişiklikleri gibi birçok faktör serilerde yapısal değişimlere yol açabilmektedir. Bu değişimler bazen keskin (sharp) bazen ise daha yumuşak (smooth) şekilde ortaya çıkabilmektedir. Enders ve Lee (2012), serilerde meydana gelebilecek yumuşak yapısal kırılmaları dikkate alarak Fourier bileşenlerini genişletilmiş Dickey-Fuller (ADF) modeline dahil ederek ADF testinin modifiye edilmiş bir versiyonunu literatüre kazandırmıştır. Bu yaklaşımda, yapısal kırılmaların varlığı aşağıdaki gibi tanımlanan bir deterministik terim kullanılarak dikkate alınmaktadır:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \gamma_1 \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \gamma_2 \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) \quad (2)$$

Burada, k Fourier terimlerinin frekans sayısını temsil etmektedir. Fourier terimleri, Eşitlik (2)'deki sinüs ve kosinüs fonksiyonları ile periyodik kalıpların ve yumuşak geçişlerin yakalanmasına olanak sağlamaktadır. Fourier terimleri ile modifiye edilmiş genişletilmiş Dickey-Fuller (FADF) testi için Enders ve Lee (2012) tarafından önerilen model aşağıdaki gibidir:

$$\Delta y_t = \alpha_1 + \delta t + \beta y_{t-1} + \gamma_1 \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \gamma_2 \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \sum_{i=1}^p \theta_i \Delta y_{t-i} + u_t \quad (3)$$

Enders ve Lee (2012), FADF birim kök testinin gerçekleştirilmesi için iki aşamalı bir yaklaşım önermektedir. Birinci aşamada model $1 \leq k \leq 5$ aralığında tahmin edilmekte ve tahmin edilen modeller arasından

kalıntı kareleri toplamı (KKT) en düşük olan model uygun model olarak seçilmektedir. İkinci aşamada Fourier terimlerinin anlamlılığını değerlendirmek için F testi uygulanmaktadır. Eğer, Fourier terimleri F testine göre istatistiksel olarak anlamlı elde edilirse, FADF birim kök testi kullanılarak temel hipotez test edilmektedir. Fourier terimlerinin istatistiksel olarak anlamsız bulunması durumunda ise bu terimler modelden çıkarılarak geleneksel ADF birim kök testi uygulanarak temel hipotez test edilebilmektedir (Aydın ve Aydın, 2023).

Fourier ADL eşbütünlüşme testi

Banerjee vd. (2017), Fourier fonksiyonlarını Banerjee vd. (1998) eşbütünlüşme testine dahil ederek yumuşak geçişli yapısal kırılmaları dikkate alan yeni bir eşbütünlüşme testini literatüre sunmuştur. Eşbütünlüşme ilişkisinin araştırılmasında Banerjee vd, (2017) tarafından önerilen regresyon denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\Delta y_t = a(t) + \delta_1 y_{t-1} + \gamma' X_{t-1} + \varphi' \Delta X_t + \varepsilon_t \quad (4)$$

Eşitlikte a(t) olarak gösterilen deterministik terim aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \gamma_1 \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \gamma_2 \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) \quad (5)$$

Banerjee vd. (2017), potansiyel yapısal değişimleri dikkate almak amacıyla Fourier fonksiyonlarını modele dahil ederek Eşitlik (4)'ü aşağıdaki gibi genişletmiştir:

$$\Delta y_t = \alpha_0 + \gamma_1 \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \gamma_2 \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \delta_1 (y_{t-1} + \beta' X_{t-1}) + \varphi' \Delta X_t + \varepsilon_{2t} \quad (6)$$

$$\Delta X_t = \psi' \Delta X_{t-1} + \varepsilon_{3t} \quad (7)$$

Burada, y_{1t} bir skaler ve X_t bütünlüşme seviyesi 1 olan n boyutlu bir vektörü temsil etmektedir, FADL eşbütünlüşme yaklaşımında temel hipotez ($H_0 : \delta_1 = 0$) eşbütünlüşme ilişkisinin olmadığını göstermektedir. Bu hipotezde, δ_1 'in 0'a eşit olup olmadığını incelemek için bir t-testi metodolojisi kullanılmakta ve test istatistiği Eşitlik (8)'deki gibi hesaplanmaktadır:

$$t_{FADL} = \frac{\hat{\delta}_1}{se(\hat{\delta}_1)} \quad (8)$$

Burada, $\hat{\delta}_1$ sıradan en küçük kareler tahmincisini ve $se(\hat{\delta}_1)$, δ_1 'nin standart hatalarını temsil etmektedir, Son

olarak hesaplanan t_{FADL} test istatistiği Banerjee vd. (2017) çalışmasında verilen kritik değerler ile karşılaştırılarak eşbütünlüşme ilişkisinin olup olmadığına karar verilmektedir.

Fourier Yamamoto nedensellik testi

Değişkenler arasındaki nedensellik ilişkilerinin araştırılmasında literatürde en sık kullanılan yöntemlerden biri Toda ve Yamamoto (1995) nedensellik analizidir. Toda ve Yamamoto (TY) nedensellik analizi, Vektör Otoregresif (VAR) modelini temel almakta ve kısa vadeli bilgi dinamiklerini etkili bir şekilde

yakalayabilmektedir. Bu yöntemdeki kritik parametreler, serilerin maksimum bütünleşme derecesi (dmax) ve VAR modelinin uygun gecikme uzunluğudur (p), TY nedensellik testinde (p+dmax) gecikme uzunluğuna sahip VAR modeli tahmin edilerek nedensellik analizi gerçekleştirilmektedir. TY nedensellik testinin, uygulamada çeşitlik avantajları bulunmasına karşın yapısal kırılmaları dikkate almamaktadır. Bu nedenle yapısal kırılmaların olduğu serilere TY testi uygulandığında sapmalı sonuçlara yol açabilmektedir. Nazlıoğlu vd. (2016) bu sorunu ele almak için aşağıdaki gibi tanımlanan bir deterministik terimi analize dahil etmektedir:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \gamma_1 \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \gamma_2 \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) \quad (9)$$

Nazlıoğlu vd, (2016), sinüs ve kosinüs fonksiyonlarına sahip deterministik terimi TY modeline aşağıdaki gibi dahil ederek yapısal kırılmaların varlığında bu durumu dikkate almaktadır:

$$y_t = \alpha_0 + \gamma_1 \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \gamma_2 \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \beta_1 y_{t-1} + \dots + \beta_{p+dmax} y_{t-(p+dmax)} + \varepsilon_t \quad (10)$$

Burada, k frekans sayısını temsil etmektedir, Fourier Toda-Yamamoto nedensellik analizinde temel hipotez, değişkenler arasında nedensellik ilişkisinin olmadığını,

alternatif hipotez ise değişkenler arasında nedensellik ilişkisi olduğunu göstermektedir.

Ampirik Sonuçlar

Değişkenlerin tanımlanması, tanımlayıcı istatistiklerin sunulması ve modelin belirlenmesinin ardından çalışmada takip edilen adımlar Resim 4'te özetlenmiştir.

Çalışmada, ilk olarak serilerin durağan olup olmadığı Fourier ADF birim kök testi ile araştırılmıştır. FADF modelindeki Fourier terimlerinin istatistiksel olarak anlamsız bulunması durumunda ise ADF sonuçlarına yer verilmiştir. Çizelge 3, FADF ve ADF birim kök testi sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar, Fourier terimlerinin yalnızca İNV değişkeni için istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu durumda, İNV değişkeni FADF diğer değişkenler için ADF sonuçları kullanılmıştır. FADF ve ADF sonuçları tüm değişkenlerin düzey değerlerinde birim köke sahip olduğunu, birinci farkları alındığında ise durağanlaştıklarını göstermektedir. Bu sonuç, tüm serilerin I(1) bütünleşme derecesine olduğu anlamına gelmektedir. Birim kök testi bulguları değerlendirildiğinde, çalışmada kullanılması planlanan eşbütünleşme testinin uygulanması için bir engel olmadığı ve çalışmada kullanılması planlan nedensellik testi için maksimum bütünleşme derecesinin 1 olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



Çizelge 3. Birim Kök Analizleri Sonuçları

Table 3. Unit Root Analysis Results

Değişkenler	FADF					ADF		
	I(0)	I(1)	k	p	F	I(0)	I(1)	p
lnDKE	-0,658	-6,197	4/4	0/0	3,661	-0,717	-5,347*	0/0
ARG	0,339	-10,046	3/3	1/0	2,673	0,332	-7,573*	1/0
İNV	-2,532	-5,316*	4/1	2/3	13,552	-	-	-

Not: *, temel hipotezinin %1 düzeyinde reddedildiğini göstermektedir. k ve p sırasıyla optimal frekans sayısını ve gecikme uzunluğu ifade etmektedir. I(0) ve I(1) sırasıyla serinin düzey ve birinci fark değerlerini göstermektedir.

Çizelge 4. FADL Eşbütünlük Analizi Sonuçları

Table 4. FADL Cointegration Analysis Results

tFADL	k	p	AIC
-2,774	4	(1,3,1)	-1,126
Kritik Değerler	1%	5%	10%
k=4 için	-4,43	3,73	-3,36

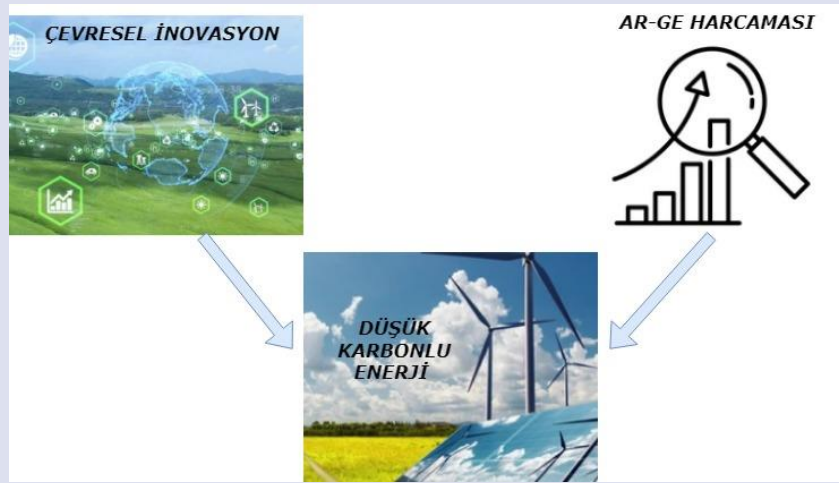
Not: k = uygun frekans sayısı ve p sırasıyla bağımlı ve bağımsız değişkenlerin uygun gecikme uzunluklarını ifade etmektedir.

Çizelge 5. Fourier Toda-Yamamoto Nedensellik Analizi Sonuçları

Table 5. Fourier Toda-Yamamoto Causality Analysis Results

Nedensellik Yönü	Wald İst,	Olasılık	k	p
lnDKE \rightarrow ARG	4,983	0,254	2	3
ARG \rightarrow lnDKE	7,658***	0,092	2	3
lnDKE \rightarrow İNV	0,356	0,955	1	3
İNV \rightarrow lnDKE	5,253**	0,030	1	1

Not: ** ve *** sırasıyla %5 ve %10 anlamlılık düzeylerinde nedensellik ilişkisi olmadığını ileri süren temel hipotezin reddedildiğini göstermektedir. k = uygun frekans sayısı ve p uygun gecikme uzunluğunu ifade etmektedir.



Resim 5. Nedensellik Test Sonuçlarının Grafiksiz Özeti
Figure 5. Graphical Abstract Of Causality Test Results

Ampirik analizin ikinci aşamasında, Eşitlik (1)'de yer alan modeldeki bağımlı (DKE) ve bağımsız değişkenler (INV ve ARG) arasındaki uzun dönemli ilişki Fourier tabanlı ADL (FADL) eşbütünlük testi kullanılarak araştırılmıştır. Çizelge 4 Fourier ADL eşbütünlük sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 4'teki sonuçlar Eşitlik (1)'de verilen modeldeki bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında uzun dönemli bir ilişkinin bulunmadığını göstermektedir. Uzun vadeli ilişkinin bulunmamasının ardından son aşamada, Eşitlik 1'deki modelde yer alan bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki kısa vadeli dinamik ilişkileri ortaya çıkarabilmek amacıyla Fourier Toda-Yamamoto nedensellik testi kullanılmıştır. Çizelge 5, Fourier Toda-Yamamoto nedensellik testi sonuçlarını göstermektedir.

Fourier Toda-Yamamoto nedensellik testi sonuçları, ARG'den ve İNV'den lnDKE değişkenine doğru tek yönlü bir nedensellik ilişkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuçlar ayrıca Resim 5'te grafiksel olarak özetlenmiştir.

Sonuç ve Değerlendirme

Çevre sorunlarının dünya çapında ciddi bir sorun haline gelmesiyle hemen her ülke bu konuda ciddi önlemler almaktadır. Özellikle Kyoto protokolüyle kirletici yakıt kullanımının azaltılması, temiz enerji kaynaklarının artırılmasına yönelik adımlar hızlandırılmıştır. Bu kapsamda teknolojik inovasyonların geliştirilmesi ve diğer ülkelere transferi konusunda ülkelere yükümlülük verilmiştir. Günümüzde çevre sorunlarının büyük bir bölümü enerji kaynaklıdır. Bu yüzden enerji talebinin karşılanmasında temiz enerji kaynakları olarak nükleer enerji ve yenilenebilir enerjinin tercih edilmesi çevresel baskıyı azaltacaktır.

Bu çalışmada 1993-2019 dönemi için Türkiye'de çevresel inovasyon ve Ar-Ge harcamalarının düşük karbonlu enerji tüketimi üzerindeki etkisi FADL eşbütünlük ve FTY nedensellik testi ile araştırılmaktadır. Çalışma sonuçlarına göre modele ait uzun dönemli ilişki bulunmamaktadır. Öte yandan nedensellik testi, Ar-Ge harcamalarından düşük karbonlu enerji tüketimine ve çevresel inovasyondan düşük karbonlu

enerji tüketimine doğru nedensellik ilişkisi olduğunu göstermektedir. Türkiye için elde edilen bu bulgular literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında, inovasyondan düşük karbonlu enerji tüketimine doğru nedensellik noktasında Kılınç ve Kılınç (2021) ve Akyol ve Mete (2022) sonuçlarını, Ar-Ge harcamalarından düşük karbonlu enerjiye doğru nedensellik noktasında ise Kılınç ve Kılınç (2021) sonuçlarını desteklemektedir. Çalışmada elde edilen uzun dönemli ilişki bulunmaması sonucu ise bu değişkenlerin bazılarının kullanıldığı ve uzun dönemli ilişkinin elde edildiği Li vd. (2020), Doğan ve Doğan (2021) ve Assi vd. (2021) çalışmalarından farklılaşmaktadır.

İklim değişikliğiyle mücadele etmek ve çevresel baskıyı hafifletebilmek için çeşitli çevre politikası araçlarının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Öte yandan temiz enerjiye geçişi sağlamaya yönelik kullanılan araçlar da çevre politikası araçları olarak kabul edilmektedir. Çevre vergileri, kirletme- atık hakkı ticareti, mali yardımlar, depozit-geri ödeme sistemleri, yasaklama ve yükümlülükler gibi çevre politikası araçları bulunmaktadır. Temiz enerjiye yönelik politikalar ise tarife garantisi (FIT), prim garantisi (FIP), kota yükümlülükleri, net ölçüm, ihale yöntemi, çevre vergisi muafiyet ve istisnaları, vergi tatili uygulaması, vergi kredileri, hızlandırılmış amortisman uygulaması, kamu yatırım harcamaları, sermaye sübvansiyonları ve indirimleri, düşük faizli krediler ve finansmanlar ile Ar-Ge harcamaları olarak sıralanabilir. Bu araçlarının içerisinde Ar-Ge harcamaları çok yönlü etkileriyle ön plana çıkmaktadır. Düşük karbonlu temiz enerjiye geçişi sağlamak için enerji alanında yapılan Ar-Ge harcamalarının yanı sıra farklı sektörlerde yapılan Ar-Ge harcamaları da yayılma yoluyla (spin-off) olumlu yönde etkili olabilir. Örneğin günümüzde uzay teknolojilerinde kullanılan birçok malzeme bugün cep telefonlarının hafif ve dayanıklı olması amacıyla kullanılmaktadır. Öte yandan akıllı telefon, uçak gibi sivil hayatta yaygın olan araçlar savunma sanayi alanındaki Ar-Ge faaliyetleri ve yenilikler sayesinde ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda farklı alanlardaki buluşlar enerji teknolojilerine entegre edilerek katkı sağlayabilir. Bunun yanı sıra enerji verimliliğini artırmak, nükleer enerji, fosil yakıt, yenilenebilir enerji gibi enerji kaynaklarında inovasyonu sağlamak amacıyla doğrudan enerji teknolojilerine yönelik yapılan Ar-Ge harcamaları da bulunmaktadır. Ar-Ge harcamaları ve getirdiği inovasyonların çok yönlü etkileri bu enstrümanı diğerlerinden ayırmaktadır. Çalışmada toplam kamu Ar-Ge harcamaları ve çevresel inovasyondan düşük karbonlu enerjiye yönelik nedensellik ilişkisi bu çok yönlü etkiyi destekler niteliktedir. Uzun dönemli bir ilişki bulunmaması bu Ar-Ge ve inovasyonun kümülatif bir süreç olmasına dayandırılabilir. Nitekim bu harcamalar yatırım harcaması niteliğinde olup başlangıçta bütçeye ek bir mali yük getirebilir. Faydaları diğer harcamalara kıyasla uzun sürede ortaya çıkabilir. Bununla birlikte Ar-Ge faaliyetlerinin getirmiş olduğu inovasyonlar da uzun dönemde fayda sağlamaktadır. Çünkü ilgili alandaki inovasyonlar faydamaliyet analizleri, risk belirleme, test aşamaları gibi birçok aşamadan geçmektedir.

Son olarak günümüzde sadece enerji alanına yönelik Ar-Ge faaliyetleri verisi sınırlı olduğu için bu çalışmada toplam Ar-Ge harcamaları göstergesi kullanılmıştır. İlerleyen çalışmalarda düşük karbonlu enerji kaynakları olan nükleer enerji ve yenilenebilir enerjiye yönelik Ar-Ge harcamalarının temiz enerjiye geçişe muhtemel etkileri ayrı model ve verilerle araştırılabilir.

Extended Abstract

As environmental problems have become a serious problem in the world, almost every country is taking serious measures. Especially with the Kyoto Protocol, steps to reduce the use of polluting fuels and increase clean energy resources have been accelerated. In this context, countries must develop and transfer technological innovations to other countries. Today, most of the environmental problems are energy-related. Therefore, choosing nuclear energy and renewable energy as clean energy sources to meet energy demand will reduce environmental pressure.

Fossil fuels are widely used in many areas to meet energy needs because they are cheap and widespread. However, since fossil fuels cause serious environmental problems, important steps are being taken to accelerate the transition to nuclear energy and renewable energy, which are low-carbon energies. Accelerating the low-carbon energy transition relies on the interconnected challenge of energy demand and environmental pollution. The spread of alternative low-carbon energy supports the fight against climate change by improving environmental quality and contributing to meeting energy demand. A large part of the pollution in Türkiye, as in the world, is energy-related. As a matter of fact, while energy-related emissions were three times higher than emissions from other sources in 1990, this difference increased to eight times in 2018 (OECD, 2021).

Therefore, the spread of alternative low-carbon energy will support the fight against climate change by improving environmental quality (Aydın and Değirmenci, 2021). Especially with the 1997 Kyoto Protocol, to which Türkiye is a party, the transition to clean energy sources was accelerated to reduce and control environmental problems (Değirmenci and Yavuz, 2021). In summary, the use of low-carbon energy is becoming widespread to improve environmental quality and meet energy demand. There are many policy tools implemented by countries to increase the use of low-carbon energy (Değirmenci and Aydın, 2023). For example, in addition to tax instruments such as exemptions for renewable energy, tax credits, and tax holidays, spending instruments such as investment expenditures, capital subsidies, and R&D expenditures are also widely used. On the other hand, countries have implemented many market-oriented practices such as feed-in tariffs, premium guarantees and quota obligations in order to increase the use of renewable energy (REN21, 2017). Among these tools, R&D expenditures come to the fore because they are a cumulative process and have a spillover effect (Aydın et al., 2023a). R&D expenditures are an important factor in the change of energy economy. Every country around the world makes R&D expenditures to develop new energy technologies as a result of environmental pressures (Jin and Zhang, 2016; Aydın et al., 2023b). R&D expenditures for the development of low-carbon energy directly affect the transition to low-carbon energy through innovation in energy production, consumption, storage, and transportation processes. On the other hand, R&D expenditures in other sectors bring innovations in the low-carbon energy sector with the spin-off effect (İnal et al., 2022; Mamkhezri and Khezri, 2023). These multifaceted effects of interrelated R&D expenditures and innovation on low-carbon energy constitute the motivation of the study.

In this study, the impact of environmental innovation and R&D expenditures on low-carbon energy consumption in Türkiye for the period 1993-2019 is examined using Fourier ADL cointegration and Fourier Toda-Yamamoto causality analysis methods. In the literature, the effect of low-carbon energy on environmental pollution has generally been examined. However, it is noteworthy that there is a lack of information about which factors affect low-carbon energy, which directly impacts environmental quality. To the best of the author's knowledge, this study is the first to examine the impact of environmental innovation and R&D expenditures on low-carbon energy consumption in Türkiye. In addition, the study aims to contribute to the literature by including unit root, cointegration, and causality tests that take into account smooth transition structural breaks.

When the studies in the literature on this subject are generally evaluated, nuclear energy or renewable energy indicators are used separately within the scope of low-carbon energy. There is no study examining the effect of R&D expenditures and environmental innovation on nuclear energy and renewable energy, which are low-carbon energy, or directly examining their effect on nuclear energy.

In the study, firstly, it was investigated whether the series were stationary or not by the Fourier ADF unit root test. If the Fourier terms in the FADF model are found to be statistically insignificant, ADF results are included. Table 3 shows the FADF and ADF unit root test results. The results show that Fourier terms are statistically significant only for the INV variable. In this case, FADF results for the INV variable and ADF results for other variables were used. FADF and ADF results show that all variables have unit roots at their level values and become stationary when their first differences are taken. In the second stage of the empirical analysis, the long-run relationship between the dependent (DKE) and independent variables (INV

and ARG) in the model in Equation (1) was investigated using the Fourier-based ADL (FADL) cointegration test. Table 4 shows the Fourier ADL cointegration results. The results in Table 4 show that there is no long-term relationship between the dependent and independent variables in the model given in Equation (1). After the long-run relationship could not be found, in the last stage, the Fourier Toda-Yamamoto causality test was used to reveal the short-term dynamic relationships between the dependent and independent variables in the model in Equation 1. Table 5 shows the Fourier Toda-Yamamoto causality test results. Fourier Toda-Yamamoto causality test results reveal that there is a unidirectional causality relationship from ARG and INV to the InDKE variable. The results are also summarized graphically in Figure 5.

The versatile effects of R&D expenditures and the innovations it brings distinguish this instrument from others. In the study, the causality relationship from total public R&D expenditures and environmental innovation to low-carbon energy supports this multifaceted effect. The lack of a long-run relationship can be attributed to the fact that R&D and innovation is a cumulative process. As a matter of fact, these expenditures are investment expenditures and may initially impose an additional financial burden on the budget. The benefits may occur over a longer period of time compared to other expenses. In addition, innovations brought about by R&D activities also provide benefits in the long term. Because innovations in the relevant field go through many stages such as benefit-cost analysis, risk determination and testing stages. Finally, since data on R&D activities only in the energy field is limited today, the total R&D expenditures indicator was used in this study. In future studies, the possible effects of R&D expenditures on nuclear energy and renewable energy, which are low-carbon energy sources, on the transition to clean energy can be investigated with separate models and data

Katkı Oranları ve Çıkar Çatışması / Contribution Rates and Conflicts of Interest

Etik Beyan	Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.	Ethical Statement	It is declared that scientific and ethical principles have been followed while carrying out and writing this study and that all the sources used have been properly cited
Yazar Katkıları	Çalışmanın Tasarlanması: TD (%60), MA (%40) Veri Toplanması: TD (%40), MA (%60) Veri Analizi: TD (%30), MA (%70) Makalenin Yazımı: TD (%60), MA (%40) Makale Gönderimi ve Revizyonu: TD (%60), MA (%40)	Author Contributions	Research Design: TD (%60), MA (%40) Data Collection: TD (%40), MA (%60) Data Analysis: TD (%30), MA (%70) Writing the Article: TD (%60), MA (%40) Article Submission and Revision: TD (%60), MA (%40)
Etik Bildirim	iibfdergi@cumhuriyet.edu.tr	Complaints	iibfdergi@cumhuriyet.edu.tr
Çıkar Çatışması	Çıkar çatışması beyan edilmemiştir.	Conflicts of Interest	The author(s) has no conflict of interest to declare.
Finansman	Bu araştırmayı desteklemek için dış fon kullanılmamıştır.	Grant Support	The author(s) acknowledge that they received no external funding in support of this research.
Telif Hakkı & Lisans	Yazarlar dergide yayınlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.	Copyright & License	Authors publishing with the journal retain the copyright to their work licensed under the CC BY-NC 4.0

Kaynakça

- Ağpak, F., & Özçiçek, Ö. (2018). Yenilenebilir Enerji Kullanımında Toplumsal Bilgi Stokunun Rolü. *Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 20(2), 7-25.
- Akyol, M., & Mete, E. (2022). Çevresel İnovasyon, Ekonomik Büyüme ve Doğrudan Yabancı Yatırımların Yenilenebilir Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (48), 393-406.
- Anton, S. G., & Nucu, A. E. A. (2020). The Effect of Financial Development on Renewable Energy Consumption. A Panel Data Approach. *Renewable Energy*, 147, 330-338.
- Assi, A. F., Isiksal, A. Z., & Tursoy, T. (2021). Renewable Energy Consumption, Financial Development, Environmental Pollution, and Innovations in the ASEAN+ 3 Group: Evidence from (P-ARDL) Model. *Renewable Energy*, 165, 689-700.
- Aydın, M., & Aydın, M. (2023). Examining the Effects of Human Development, Unemployment, and Globalization on Obesity in the Community: Evidence from BRICS Countries. *Health & Social Care in the Community*, 2023.
- Aydın, M., & Değirmenci, T. (2021). Ekonomik Büyüme, İnovasyon, Verimlilik ve Yenilenebilir Enerji Tüketiminin Çevre Kirliliği Üzerine Etkisi: Türkiye için Çevresel Kuznets Hipotezinin Analizi. *Düzce İktisat Dergisi*, 2(2), 138-151.
- Aydın, M., Degirmenci, T., & Yavuz, H. (2023b). The Influence of Multifactor Productivity, Research and Development Expenditure, Renewable Energy Consumption on Ecological Footprint in G7 Countries: Testing the Environmental Kuznets Curve Hypothesis. *Environmental Modeling & Assessment*, 1-16.
- Aydın, M., Degirmenci, T., Gurdal, T., & Yavuz, H. (2023a). The Role of Green Innovation in Achieving Environmental Sustainability in European Union Countries: Testing the Environmental Kuznets Curve Hypothesis. *Gondwana Research*, 118, 105-116.
- 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.
- Banerjee, P., Arčabić, V., & Lee, H. (2017). Fourier ADL Cointegration Test to Approximate Smooth Breaks with New Evidence from Crude Oil Market. *Economic Modelling*, 67, 114-124.
- BP (2021). Statistical Review of World Energy 2021, London: British Petroleum.
- Churchill, S. A., Inekwe, J., & Ivanovski, K. (2021). R&D Expenditure and Energy Consumption in OECD Nations. *Energy Economics*, 100, 105376.
- Climate Watch (2023). Historical GHG Emissions, <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>, Erişim Tarihi: 14.09.2023.
- Çoban, M. N., Kangal, N., Eroğlu, İ., & Yeter, F. (2021). İnovasyonun Yenilenebilir Enerji Üretimine Etkisi: IEA Üyesi Ülkeler Üzerine Panel Veri Analizi. *Aydın İktisat Fakültesi Dergisi*, 6(2), 21-31.
- Degirmenci, T., & Aydın, M. (2023). The Effects of Environmental Taxes on Environmental Pollution and Unemployment: A Panel Co-Integration Analysis on The Validity of Double Dividend Hypothesis for Selected African Countries. *International Journal of Finance & Economics*, 28(3), 2231-2238.
- Değirmenci, T. ve Yavuz, H. (2021). Emisyon Azaltım Sorumluluğu Olan BM Ülkelerinde Hava Kirliliği, Sağlık Harcamaları ve Ekonomik Büyüme İlişkisi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 16(3), 856 – 872.
- Dong, K., Hochman, G., Zhang, Y., Sun, R., Li, H., & Liao, H. (2018). CO2 Emissions, Economic and Population Growth, and Renewable Energy: Empirical Evidence Across Regions. *Energy Economics*, 75, 180-192.
- Enders, W., & Lee, J. (2012). The Flexible Fourier Form And Dickey–Fuller Type Unit Root Tests. *Economics Letters*, 117(1), 196-199.
- Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023). <https://www.energyinst.org/statistical-review>, Erişim Tarihi: 14.09.2023.
- Gan, J., & Smith, C. T. (2011). Drivers for Renewable Energy: A Comparison Among OECD Countries. *Biomass and Bioenergy*, 35(11), 4497-4503.
- Godil, D. I., Sharif, A., Ali, M. I., Ozturk, I., & Usman, R. (2021). The Role of Financial Development, R&D Expenditure, Globalization and Institutional Quality in Energy Consumption in India: New Evidence from the QARDL Approach. *Journal of environmental management*, 285, 112208.
- Gozgor, G., Mahalik, M. K., Demir, E., & Padhan, H. (2020). The Impact of Economic Globalization on Renewable Energy in the OECD Countries. *Energy Policy*, 139, 111365.
- IEA (2021). World Energy Outlook 2021 (IEA), <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>, (Erişim tarihi: 10.09.2023).
- Inal, V., Gurdal, T., Degirmenci, T., & Aydın, M. (2022). The Effects of Military Expenditures on Labor Productivity, Innovation and Economic Growth for the Most Militarized Countries: Panel Data Analysis. *Kybernetes*, (ahead-of-print).
- İEA (2021), World Energy Balances Highlights 2021, <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>, (Erişim tarihi: 10.09.2023).
- Jin, W., & Zhang, Z. (2016). On the Mechanism of International Technology Diffusion for Energy Technological Progress. *Resource and Energy Economics*, 46, 39-61.
- Kılınc, E. C., & Kılınc, N. Ş. (2021). Ar-Ge ve İnovasyonun Yenilenebilir Enerji Üretimi Üzerindeki Etkisi: Panel Veri Analizi. *Alanya Akademik Bakış*, 5(2), 1087-1105.
- Kocsis, I., & Kiss, J. T. (2015). Renewable Energy Consumption, R&D and GDP in European Union Countries. *Environmental Engineering and Management Journal*, 13(11), 2825-2830.
- Li, J., Zhang, X., Ali, S., & Khan, Z. (2020). Eco-innovation and Energy Productivity: New Determinants of Renewable Energy Consumption. *Journal of Environmental Management*, 271, 111028.
- Li, W., Cao, N., & Xiang, Z. (2023). Drivers of Renewable Energy Transition: The Role of ICT, Human Development, Financialization, and R&D Investment in China. *Renewable Energy*, 206, 441-450.
- Mamkhezri, J., & Khezri, M. (2023). Assessing the Spillover Effects of Research and Development and Renewable Energy on CO2 Emissions: International Evidence. *Environment, Development and Sustainability*, 1-30.
- Naimoglu, M., & Özbek, S. (2022). İngiltere’de Enerji Ar-Ge Harcamaları ile Enerji Tüketimi İlişkisi: Yapısal Kırılmali Esbutunlesme Analizi. *İsletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*, 10(1), 35-45.
- Nazlioglu, S., Gormus, N. A., & Soytaş, U. (2016). Oil Prices and Real Estate Investment Trusts (REITs): Gradual-shift Causality and Volatility Transmission Analysis. *Energy Economics*, 60, 168-175.
- OECD (2021). https://stats.oecd.org/viewhtml.aspx?data_setcode=AIR_GHG&lang=en, (Erişim tarihi: 10.09.2023).
- REN21 (2017). Renewables 2017 Global Status Report. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2017_Full-Report_English.pdf, Erişim Tarihi: 25.07.2023
- Salim, R. A., & Shafiei, S. (2014). Urbanization and Renewable and Non-renewable Energy Consumption in OECD Countries: An Empirical Analysis. *Economic Modelling*, 38, 581-591.

- Shafiei, S., & Salim, R. A. (2014). Non-renewable and Renewable Energy Consumption and CO2 Emissions in OECD Countries: A Comparative Analysis. *Energy Policy*, 66, 547-556.
- Su, C. W., Umar, M., & Khan, Z. (2021). Does Fiscal Decentralization and Eco-innovation Promote Renewable Energy Consumption? Analyzing the Role of Political Risk. *Science of The Total Environment*, 751, 142220.
- Toda, H. Y., & Yamamoto, T. (1995). Statistical Inference in Vector Autoregressions with Possibly Integrated Processes. *Journal of Econometrics*, 66(1-2), 225-250.
- UNFCCC (2021), UN Climate Change Conference UK 2021 (COP26). <https://ukcop26.org/>, Erişim Tarihi: 11.09.2023
- Wang, Q., Li, S., & Pisarenko, Z. (2020). Heterogeneous Effects of Energy Efficiency, Oil Price, Environmental Pressure, R&D Investment, and Policy on Renewable Energy--Evidence from the G20 Countries. *Energy*, 209, 118322.
- Yalçın, A. Y., & Özcan, O. (2021). Yenilenebilir Enerji Üretimi ve Destekleri Üzerine Bir Tahmin Modeli Önerisi. *Journal of Life Economics*, 8(2), 263-272.
- YEPP (2014). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı, Aralık 2014