

Temiz Enerji ve Yeşil Teknoloji Arasındaki Zamanla Değişen Nedensellik: COVID-19'dan Kanıtlar

Nesrin AKBULUT^a

Öz

Sürdürülebilirlik literatüründe temiz enerji ve yeşil teknoloji kavramlarına yönelik ilgi giderek artmasına rağmen, özellikle COVID-19 sonrası dönemde bu iki alan arasındaki zamanla değişen nedensel ilişkiye dair ampirik kanıtlar sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı, 2 Ocak 2020–2 Ekim 2025 dönemine ait günlük verileri kullanarak, Shi vd. (2018, 2020) tarafından geliştirilen zamanla değişen Granger nedensellik yaklaşımı çerçevesinde tekrarlamalı gelişen pencere yöntemi ile temiz enerji ve yeşil teknoloji arasındaki nedensellik ilişkisini incelemektir. Bulgular, temiz enerjiden yeşil teknolojiye doğru nedenselliğin %5 anlamlılık düzeyinde yalnızca belirli alt dönemlerde ortaya çıktığını ve bu ilişkinin tüm örneklem boyunca istikrarlı olmadığını göstermektedir. Buna karşılık, yeşil teknolojiden temiz enerjiye doğru anlamlı bir zamanla değişen nedensellik tespit edilmemiştir. Sonuçlar, pandemi sonrası dönemde temiz enerjinin yeşil teknolojiler açısından dönemsel olarak tetikleyici bir rol oynadığını, ancak bu etkinin zamana ve konjonktürel koşullara karşı duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda çalışma, sürdürülebilir enerji dönüşümünde zamana duyarlı politika tasarımlarının önemine işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler:

Temiz Enerji,
Yeşil Teknoloji,
Zamanla Değişen
Nedensellik.

JEL Sınıflandırması:

C58, Q01, Q43

Time-Varying Causality Between Clean Energy and Green Technology: Evidence from the COVID-19

Abstract

Despite the increasing emphasis on clean energy and green technology in the sustainability literature, empirical evidence on the time-varying causal relationship between these two domains remains limited, particularly in the post-COVID-19 period. Therefore, the main objective of this study is to investigate the causal relationship between clean energy and green technology using daily data covering the period from 2 January 2020 to 2 October 2025, within the framework of the time-varying Granger causality approach developed by Shi et al. (2018, 2020) and by employing the recursive evolving window method. The findings show that causality from clean energy to green technology emerges at the 5% significance level only during certain subperiods, indicating that this relationship does not exhibit a stable and persistent structure throughout the entire sample. In contrast, no statistically significant time-varying causality is found from green technology to clean energy. These results suggest that, in the post-pandemic period, clean energy plays a periodically triggering role for green technologies, while this effect varies over time and depending on conditions.

Keywords:

Clean Energy,
Green Technology,
Time-Varying
Causality.

JEL Classification:

C58, Q01, Q43

^a Arş. Gör., Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, İktisadi, İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü, Alanya, Türkiye, nesrin.akbulut@alanya.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1460-0950

1. Giriş

Ekonomik büyüme, hızlı endüstrileşme ve artan enerji talebi, özellikle gelişmekte olan ülkelerde çevresel bozulmayı hızlandırarak küresel ısınma ve iklim değişikliğini derinleştirmektedir. Birleşmiş Milletler'in Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH) doğrultusunda, düşük karbonlu bir ekonomiye geçişin sağlanması ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi amacıyla temiz enerji kullanımının yaygınlaştırılması ve yeşil teknoloji yatırımlarının güçlendirilmesi küresel politika gündeminin merkezinde yer almaktadır. Yeşil teknolojiler; rüzgâr, güneş ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji sistemlerinden enerji depolama çözümlerine, atık azaltım teknolojilerinden yeşil üretim süreçlerine kadar geniş bir yelpazede çevresel etkileri azaltmayı hedefleyen yenilikçi uygulamaları kapsamaktadır. Geleneksel kalkınma modellerine kıyasla bu teknolojiler, çevre üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirerek sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynamaktadır (Luo vd., 2019). Bu kapsamda, yeşil teknolojiler karbon emisyonlarının azaltılmasının yanı sıra sürdürülebilir ekonomik büyüme, enerji verimliliği ve uzun vadeli çevresel kaliteyi destekleyen stratejik bir dönüşüm alanı olarak öne çıkmaktadır.

İlgili literatür, yeşil teknoloji dönüşümünün ve temiz enerji yatırımlarının önündeki önemli engellerden birinin finansman kısıtları olduğunu ortaya koymaktadır. Yeşil yatırımların yüksek başlangıç maliyetleri (Eyraud vd., 2011), uzun geri ödeme süreleri ve belirsiz getiri profilleri (Yoshino ve Taghizadeh-Hesary, 2019), finansal kurumların bu alanlara yönelme isteğini sınırlamakta ve fosil yakıta dayalı geleneksel projelerin görece cazibesini sürdürmesine neden olmaktadır (Yoshino vd., 2019). Nitekim Shi vd. (2025), Çin imalat sektöründe sürdürülebilir enerji teknolojilerinin benimsenmesini zorlaştıran temel faktörlerin yüksek başlangıç yatırım maliyetleri, uzun geri ödeme süreleri ve finansman olanaklarının yetersizliği olduğunu göstermiştir. Bu durum, iklim finansmanının ve kamu destekli yönlendirici politikaların önemini artırmakta; yeşil finansman mekanizmalarının enerji dönüşümündeki rolünü ön plana çıkarmaktadır (Sachs vd., 2019; Zadek ve Zhang, 2014).

Son yıllarda teknolojik yenilik, enerji dönüşümü ve çevresel kalite arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar artmıştır. Yenilenebilir enerji tüketiminin ve yeşil teknolojik gelişmelerin karbon emisyonlarını azalttığı (Shan vd., 2021; Fang, 2023; Sun vd., 2022), ekolojik ayak izini düşürdüğü (Yu vd., 2023; Chen vd., 2023) ve sürdürülebilir üretim süreçlerini güçlendirdiği (Piprani vd., 2025) farklı bağlamlarda ortaya konmuştur. Ayrıca kurumsal kalite, ekonomik küreselleşme, hükümet istikrarı ve yeşil finans mekanizmalarının enerji dönüşümünü desteklediğine dair bulgular da literatürde giderek ağırlık kazanmaktadır (Han vd., 2023; Aydın vd., 2024; Uche vd., 2025). Ancak, temiz enerji ile yeşil teknoloji arasındaki ilişkiyi inceleyen literatürün önemli bir bölümü, değişkenler arasındaki nedenselliği zaman boyunca sabit varsayan geleneksel Granger nedensellik yaklaşımlarına dayanmaktadır (bknz: literatür taraması). Bu yaklaşımlar, ortalama ilişkileri yakalamakta başarılı olmakla birlikte, özellikle COVID-19 gibi küresel şokların yaşandığı dönemlerde nedensel ilişkilerin nasıl evrildiğini, hangi dönemlerde güçlenip hangi dönemlerde zayıfladığını ortaya koymakta yetersiz kalmaktadır. Oysa enerji dönüşümü süreci, krizler ve politika müdahaleleri karşısında oldukça kırılğan ve dinamik bir yapı

sergilemektedir. Bununla ilgili olarak, Madaleno vd. (2022) ile Emirmahmutoglu vd. (2021), sabit parametre varsayımına dayanan geleneksel Granger nedensellik testlerinin piyasalar arasındaki kırılma ve dinamik yapıyı yakalamakta yetersiz kaldığını; kısa süreli nedensellik dönemlerinin ortalama kaybolduğunu belirtmektedir. Buna karşılık zamanla değişen Granger nedensellik yaklaşımı (Shi vd. 2018; Shi vd, 2020), ilişkinin hangi dönemlerde, hangi yönde ve ne ölçüde ortaya çıktığını belirleyerek piyasalar arasındaki etkileşiminin gerçek doğasını daha doğru biçimde analiz etmeye olanak sağlamaktadır. Bu nedenle, temiz enerji ile yeşil teknoloji arasındaki nedensel ilişkinin yalnızca varlığının değil, zaman içindeki değişiminin analiz edilmesi hem teorik hem de politik açıdan önemlidir.

Literatürde sınırlı sayıda çalışmalardan Madaleno vd. (2022) 31 Temmuz 2014-12 Ekim 2021 dönemine ait günlük veriler kullanarak yeşil finans, temiz enerji, çevresel sorumluluk ve yeşil teknoloji arasındaki nedensellik ilişkilerini yeni zamanla değişen Granger nedensellik yaklaşımıyla incelemiş ve ilişkilerin özellikle COVID-19 sürecinde dönemsel ve kırılma bir yapı sergilediğini göstermiştir. Benzer şekilde Hammoudeh vd. (2020), 30 Temmuz 2014-10 Şubat 2020 dönemine ait günlük veriler üzerinden yeşil tahviller, temiz enerji endeksi ve finansal göstergeler arasındaki nedenselliği zamanla değişen bir çerçevede analiz etmiş ve değişkenler arasındaki nedensel ilişkilerin istikrarsız ve dönemsel olduğunu ortaya koymuştur.

Bunlardan farklı olarak, bu çalışma, temiz enerji ile yeşil teknoloji arasındaki nedensel ilişkiyi doğrudan merkeze alarak, söz konusu etkileşimin COVID-19 ve sonrası dönemde nasıl bir seyir izlediğini zaman boyutunu dikkate alan bir çerçevede incelemektedir. Bu kapsamda, 2 Ocak 2020- 2 Ekim 2025 dönemine ait günlük veriler kullanılarak, Shi vd. (2018) ve Shi vd. (2020) tarafından geliştirilen zamanla değişen Granger nedensellik yaklaşımı uygulanmıştır. Böylece çalışma, iki değişken arasındaki ilişkinin yalnızca varlığını değil, pandemi ve pandemi sonrası dönemde zaman içinde nasıl şekillendiğini; hangi alt dönemlerde, hangi yönde ve hangi düzeyde etkili olduğunu sistematik biçimde ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde yapılandırılmıştır. Giriş bölümünü takip eden ikinci bölümde literatür taraması verilmiştir. Üçüncü bölümde veri seti ve yöntem tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde bulgular sunulmuş, son bölümde ise sonuç ve teorik çıkarımlara yer verilmiştir.

2. Literatür

Ekolojik sürdürülebilirliğin sağlanmasında yeşil teknolojideki ilerlemeler ve temiz enerjiye geçiş süreçleri kritik bir önem taşımaktadır. Literatürde, farklı ülkeler ve dönemler üzerinden yürütülen çok sayıda çalışma, bu iki değişkenin çevresel kalite, karbon emisyonları, ekolojik ayak izi ve yük kapasitesi faktörü üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde incelemiştir. Ancak, yeşil teknoloji ile temiz enerji arasındaki karşılıklı nedenselliği doğrudan ele alan araştırmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Bu sınırlılık, özellikle ilişkilerin ekonomik dalgalanmalar, piyasa belirsizlikleri ve küresel şoklar karşısında zaman içinde değişebileceğini ortaya koyan yaklaşımlar açısından daha belirgindir.

Buna göre son dönem çalışmalar, değişenler arasındaki etkileşimlerin durağan bir yapıya sahip olmadığını dönemsel olarak güçlenip zayıflayabilen dinamik bir ilişki sergilediğini göstermektedir. Örneğin, Madaleno vd. (2022) 31 Temmuz 2014-12 Ekim 2021 dönemine ait günlük verileri kullanarak yeşil teknoloji, temiz enerji, yeşil finans, temiz enerji, çevre sorumluluğu arasındaki nedensellik ilişkisini Shi vd. (2018) ile Shi vd. (2020) tarafından geliştirilen zamanla değişen Granger nedensellik testi ile analiz etmiş ve değişkenler arasında dönemsel olarak çift yönlü ancak zamana duyarlı ve kırılğan nedensellik ilişkileri bulunduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, Covid-19 gibi büyük ölçekli şok dönemlerinde bu nedensel bağların zayıfladığı raporlanmıştır. Benzer şekilde Hammoudeh vd. (2020), 30 Temmuz 2014-10 Şubat 2020 dönemi için yeşil tahviller, ABD tahvil faizleri, temiz enerji endeksi ve CO₂ emisyon izinleri arasındaki ilişkiyi zamanla değişen Granger nedensellik yaklaşımı ile incelemiş ve enerji-finance göstergeler arasındaki ilişkilerin istikrarlı olmadığını; nedenselliğin ise yalnızca belirli dönemlerde ortaya çıktığını belirtmiştir. Hun vd. (2023) ise 1992-2020 dönemine ait E-7 ülkeleri verileri üzerinden yeşil teknolojiler, hükümet istikrarı, ekonomik küreselleşme ve ekonomik büyümenin yeşil enerji geçişi üzerindeki etkisini zamanla değişen panel Granger nedensellik testini kullanarak incelemiş ve bu değişkenlerin yeşil enerji dönüşümünün Granger nedeni olduğunu ortaya koymuştur.

Geleneksel Granger nedensellik yaklaşımı kullanılarak da yeşil teknoloji, temiz enerji ve çevresel kalite arasındaki ilişkiler farklı ülke ve dönemlerde kapsamlı biçimde incelenmiştir. Örneğin, Shahbaz vd. (2021) Mart 2005-Mayıs 2021 dönemine ait günlük verilerle temiz enerji endeksleri, teknoloji hisseleri, petrol fiyatları ve piyasa göstergeleri arasındaki etkileşimleri analiz etmiş ve küresel finans krizi ile Covid-19 gibi stres dönemlerinde temiz enerji ile geleneksel enerji ve hisse senedi piyasaları arasında çift yönlü nedensellik ilişkileri tespit etmiştir. Shan vd. (2021) ise Türkiye için 1990-2018 dönemi kapsamında yeşil teknoloji inovasyonu, enerji tüketimi, yenilenebilir enerji, nüfus ve kişi başına gelir ile CO₂ emisyonları arasında karşılıklı nedensellik olduğunu ve ekonomik-demografik faktörlerin emisyon dinamiklerini belirgin şekilde etkilediğini göstermiştir. Mahou vd. (2022), Kaliforniya için 1987-2017 dönemine yönelik analizinde yenilenebilir enerji tüketimi ile CO₂ emisyonları arasında kısa vadede çift yönlü bir nedensellik ilişkisi olduğunu ortaya koymuştur. Usman vd. (2020), Pakistan'da temiz enerji tüketiminin karbon emisyonları üzerindeki kısa ve uzun vadeli etkilerinin asimetrik bir yapıya sahip olduğunu belirtirken; Murshed vd. (2021), Bangladeş'te fosil olmayan yakıt tüketimi ile karbon ayak izi arasında çift yönlü nedensellik olduğunu raporlamıştır. Çin için Sun vd. (2022), kantil-bazlı Granger nedensellik analizleriyle temiz enerji tüketimi ve yeşil yatırımların karbon emisyonlarını uzun dönemde azalttığını ve emisyon seviyelerine bağlı olarak değişen çift yönlü nedensellik ilişkilerinin mevcut olduğunu göstermiştir. Avrupa Birliği ulaşım sektörü için Kwilinski vd. (2024), yenilenebilir enerji kullanımının CO₂ emisyonlarını tutarlı biçimde azaltarak çevresel kalite üzerinde nedensel bir iyileşme yarattığını belirtmiştir. Benzer şekilde, Şahin vd. (2025) BRICS-T ülkelerinde çevresel politika sıklığı, enerji dönüşümü, yeşil teknoloji ve birincil enerji tüketimi ile sera gazı emisyonları arasında çift yönlü nedensellik ilişkisi bulunduğunu ve yeşil teknolojilerin çevresel performansın ayrılmaz bir unsuru olduğunu vurgulamıştır. Afrika ülkeleri

örnekleminde Khurshid vd. (2024) Hanehalkı yeşil teknolojinin benimsenmesinden toplam yeşil inovasyon ve kurumsal kaliteye doğru tek yönlü nedensellik olduğunu göstererek kurumsal yapı ile teknolojik gelişmelerin sürdürülebilir uygulamalar üzerindeki belirleyici rolüne dikkat çekmiştir. Son olarak, Pata vd. (2023) ABD'de 1974–2018 dönemini inceleyerek temiz enerji teknolojilerinin çevresel kaliteyi kısa vadede artırmasına rağmen uzun vadede anlamlı bir etkisinin bulunmadığını ve çevresel kaliteye doğru bir nedensellik ilişkisi tespit edilmediğini raporlamıştır. Bu çalışmalar bütüncül olarak değerlendirildiğinde, yenilenebilir enerji ve yeşil teknolojilerin çevresel kalite ve karbon emisyonları üzerindeki etkilerinin çoğu bağlamda nedensel bir ilişkiyi yansıttığı, ancak bu ilişkinin ülkelerin yapısal özellikleri, ekonomik koşullar, politika uygulamaları gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterdiği söylenebilir.

Literatürde, temiz enerji teknolojileri ve yeşil inovasyonun çevresel kalite, ekolojik sürdürülebilirlik ve enerji piyasalarındaki etkileşimler üzerindeki rolünü değerlendiren çok boyutlu çalışmalar da bulunmaktadır. Fang (2023) Çin'in 32 eyaleti için yaptığı analizde yenilenebilir enerji yatırımları ile yeşil teknoloji inovasyonunun uzun dönemde karbon emisyonlarını anlamlı biçimde azalttığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Yu vd. (2023) 1996–2020 döneminde ekolojik ayak izi en yüksek ekonomileri inceleyerek temiz enerji teknolojileri, enerji verimliliği, sanayileşme ve sürdürülebilir politika göstergelerinin etkilerini analiz etmiş ve temiz enerji teknolojilerinin ekolojik ayak izini farklı yüzdelik dilimlerde azaltma yönünde tutarlı bir eğilim sergilediğini bulmuştur. Avrupa Birliği özelinde Chen vd. (2023), 1998–2019 dönemi için enerji geçişi ve enerji patentlerinin ekolojik ayak izini uzun vadede düşürdüğünü, buna karşılık yenilenemeyen enerji kullanımı ile doğal kaynak tüketiminin çevresel baskıyı artırdığını belirtmiştir. Kanada örneğinde Ali vd. (2025), 1990–2023 dönemine ilişkin analizinde yeşil yatırım, kurumsal kalite ve jeopolitik risklerin rolünü de dahil ederek hem yeşil hem de yeşil olmayan teknolojik inovasyonların karbon emisyonları üzerindeki etkilerini değerlendirmiş. Bulgular yeşil inovasyon ve yeşil yatırımların emisyonları azaltarak çevresel kaliteyi iyileştirdiğini, buna karşılık yeşil olmayan inovasyon ile jeopolitik risklerin emisyonları artırdığını göstermiştir. BRICS ülkeleri için ise Uche vd. (2025) 1980–2021 dönemi boyunca yeşil teknoloji, yeşil geçiş, doğal kaynak kullanımı, ekonomik büyüme ve kentleşme gibi değişkenleri içeren analizinde, yeşil geçişlerin yük kapasitesi faktörünü (LCF) anlamlı biçimde artırdığını ve yeşil teknolojilerin çevresel sürdürülebilirliği destekleyici etkiler yarattığını raporlamıştır. Aydın vd. (2024), çevre teknolojisine en fazla yatırım yapan on AB ülkesinde, çevre teknolojileri, kurumsal kalite, küreselleşme ve ekonomik büyümenin sürdürülebilir çevre performansı üzerindeki etkilerini araştırmış ve çevre teknolojilerinin etkisinin ülkelere göre belirgin biçimde farklılık gösterdiğini; bazı ülkelerde ise kurumsal kalite ve küreselleşme dinamiklerinin çevresel kaliteyi şekillendiren temel belirleyiciler olduğunu ortaya koymuştur. Pakistan için İkrām vd. (2021), yeşil teknoloji yatırımlarının sürdürülebilir üretim hedefleriyle olan uyumunu sekiz gösterge üzerinden değerlendirmiş ve özellikle tarım-ormancılık ile çevresel kalite göstergelerinin yeşil teknoloji için kritik alanlar olduğunu belirlemiştir. Piprani vd. (2025) daha temiz üretim uygulamalarıyla birleşen yeşil teknolojilerin enerji verimliliğini artırarak kurumsal sürdürülebilirlik performansını iyileştirdiğini göstermiştir. Çin bağlamında Huo vd. (2025), yeşil teknoloji ve

yenilenebilir enerji sistemlerinin tüm kantillerde sürdürülebilir ekonomik büyümeyi desteklediğini ve uzun dönemli çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik için kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Dogan vd. (2025) ise BRICS ülkelerinde 2000–2022 dönemi için yeşil teknolojinin, araştırma-geliştirmenin, ekonomik karmaşıklığın ve dijital ekonominin yenilenebilir enerji inovasyonu üzerindeki etkilerini incelemiş ve özellikle yeşil teknolojinin yenilenebilir enerji inovasyonunu anlamlı şekilde artırdığını göstermiştir. Çalışmalar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, temiz enerji teknolojileri, yeşil inovasyon ve kurumsal dinamiklerin çevresel sürdürülebilirliğin şekillenmesinde temel belirleyiciler olarak öne çıktığı görülmektedir.

3. Veri Seti ve Yöntem

3.1. Veri Seti

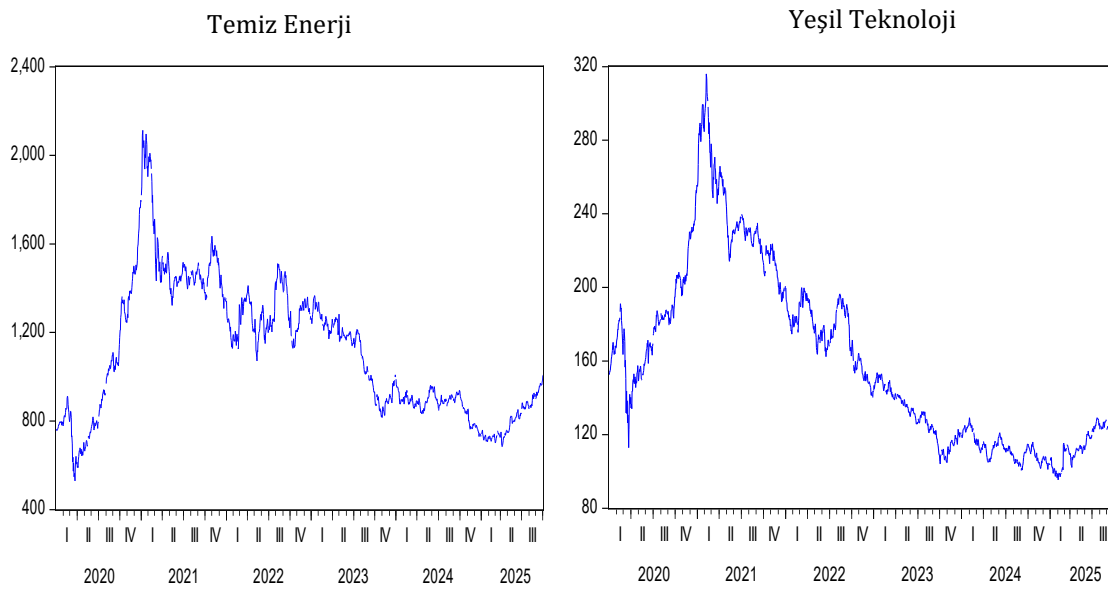
Bu çalışmada, temiz enerji ile yeşil teknoloji piyasaları arasındaki dinamik ve zamanla değişen nedensellik ilişkisi, Shi vd. (2018) ve Shi vd. (2020) tarafından geliştirilen zamanla değişen Granger nedensellik yaklaşımı kullanılarak incelenmektedir. Analiz, 2 Ocak 2020 – 2 Ekim 2025 dönemini kapsamaktadır. Bu dönem, COVID-19 pandemisinin küresel enerji piyasaları üzerindeki kırılma etkilerinin başladığı süreci ve pandemi sonrasında ortaya çıkan yeniden yapılanma, teknolojik dönüşüm ve politika odaklı enerji hamlelerinin yoğunlaştığı kritik zaman aralığını içermesi bakımından özellikle önemlidir. Dolayısıyla çalışma, iki piyasa arasındaki nedenselliğin pandemi sonrası dönemde nasıl evrildiğini ve bu dönüşümün enerji-teknoloji etkileşimini yapısal olarak nasıl yeniden şekillendirdiğini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Çalışmada temiz enerji piyasasını temsilen S&P Küresel Temiz Enerji Endeksi, yeşil teknoloji piyasasını temsilen ise S&P Yenilenebilir Enerji ve Temiz Teknoloji Endeksi kullanılmıştır. Bu iki endeks benzer tematik alanlara odaklanmakla birlikte, temsil ettikleri piyasa yapıları ve kapsadıkları şirket profilleri bakımından farklılık göstermektedir. S&P Küresel Temiz Enerji Endeksi, ABD, Avrupa, Asya ve Kanada dâhil çeşitli bölgelerdeki borsada işlem gören temiz enerji şirketlerini içeren ve küresel temiz enerji sektörünün performansını ölçen geniş kapsamlı bir uluslararası endekstir. S&P Yenilenebilir Enerji ve Temiz Teknoloji Endeksi ise Kanada borsasında işlem gören ve temel faaliyeti yenilenebilir enerji ile temiz teknoloji çözümleri geliştirmek olan şirketlerin performansını ölçen, bölgesel ve teknoloji odaklı bir endekstir. Dolayısıyla iki endeks tematik açıdan benzer olsa da coğrafi kapsamaları ve sektör yapıları farklıdır ve bu farklılıklar çalışmada nedensellik ilişkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesini mümkün kılmaktadır. İki endekse ait günlük veriler Investing.com veri tabanından temin edilmiştir. Veri seti, pandemi sonrası enerji dönüşümünün etkilerini ayrıntılı biçimde gözlemleyebilmek amacıyla mümkün olan en uzun zaman aralığını kapsayacak şekilde oluşturulmuştur. Analiz öncesinde her iki serinin durağanlık özellikleri incelenmiş ve serilerin birinci farkları alınarak modele dâhil edilmiştir. Değişkenlere ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Tanımlayıcı İstatistikler

Değişkenler	Ortalama	Medyan	En Büyük	En Küçük	Std. Sapma	Gözlem Sayısı
Temiz Enerji	0.169	0.220	134.650	-124.160	21.730	1437
Yeşil Teknoloji	-0.010	0.020	13.610	-18.720	2.702	1437

Analiz edilen değişkenlerin zaman içindeki seyri Grafik 1'de gösterilmiştir. Her iki endekste 2020 yılından itibaren COVID-19 pandemisinin etkisiyle güçlü bir yükseliş eğilimi görülmektedir. Endeksler 2021 yılının başlarında en yüksek seviyelerine ulaştıktan sonra kademeli bir düşüş eğilimine girmiştir.



Grafik 1. Değişkenlerin Zaman Seyri

3.2. Yöntem

Ekonomik ve finansal zaman serilerinde yapısal kırılmalar, rejim değişimleri ve dışsal şoklar, değişkenler arasındaki nedensellik ilişkilerinin zaman içinde farklılaşmasına yol açabilmektedir. Bu durum, nedensel ilişkilerin tüm örneklem dönemi boyunca sabit kaldığını varsayan geleneksel Granger nedensellik testlerinin dinamik ekonomik ortamlarda yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, temiz enerji (TE) ile yeşil teknoloji (YT) arasındaki Granger nedensellik ilişkilerinin zamana bağlı olarak nasıl evrildiğini analiz etmek amacıyla Shi vd. (2018) ve Shi vd. (2020) tarafından geliştirilen yeni zamanla değişen nedensellik yaklaşımı kullanılmıştır. Söz konusu yaklaşım; ileri doğru genişleyen pencereli (forward expanding window-FEW), kayar pencereli (rolling window-RW) ve tekrarlamalı gelişen pencereli (recursive evolving window-REW) yöntemi olmak üzere üç farklı algoritmaya dayanmaktadır.

Granger nedensellik yaklaşımları, verilerin alt örneklemelerinden hesaplanan MWald istatistiklerine dayanmaktadır. f_1 ve f_2 'nin, tahmin edilen regresyonun başlangıç ve bitiş

noktaları; f 'nin ise ilgili gözlem olduğu varsayılın. Buna göre, $\tau_1 = [f_1 T]$ ve $\tau_2 = [f_2 T]$ olsun; burada $[\cdot]$ zaman boyutu olan T 'nin tamsayı kısmını göstermektedir. Benzer şekilde $\tau_w = [f_w T]$ olup, τ_w LA-VAR modelinin tahmin edilebilmesi için gerekli minimum gözlem sayısını ifade etmektedir.

FEW yaklaşımı için regresyon başlangıç noktası (τ_1) mevcut olan ilk gözlemde sabitlenir ve regresyon pencere büyüklüğü τ_w 'den T 'ye doğru genişler. Dolayısıyla, regresyonun bitiş noktası τ_w 'den T 'ye doğru ilerler. RW yaklaşımı için ise, FEW yaklaşımına benzer şekilde regresyon bitiş noktası $\tau_2 = \{\tau_2, \dots, T\}$ 'dir. Ancak bu yaklaşımda regresyon pencere büyüklüğü (τ_w) sabittir ve bu nedenle regresyon başlangıç noktası $\tau_2 = \tau_2 - \tau_w + 1$ şeklinde belirlenir. Öte yandan REW yaklaşımı hem FEW yaklaşımını hem de RW yaklaşımını birleştirmektedir. REW yaklaşımında, regresyonun başlangıç ve bitiş noktaları ile regresyon pencere büyüklüğü birlikte değişmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada REW yaklaşımı izlenmiştir. Bu yaklaşımın temel özellikleri Grafik 2'de gösterilmektedir.

Örneklem büyüklüğü oranı $f_w = f_2 - f_1 \geq f_0$ olmak üzere her bir alt örneklem regresyonu için $[f_1, f_2]$ aralığında gözlemler kullanılarak elde edilen MWald istatistiği $W_{f_1}^{f_2}$ ile gösterilir. Ardından, test istatistiği MWald istatistik dizisinin supremumu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

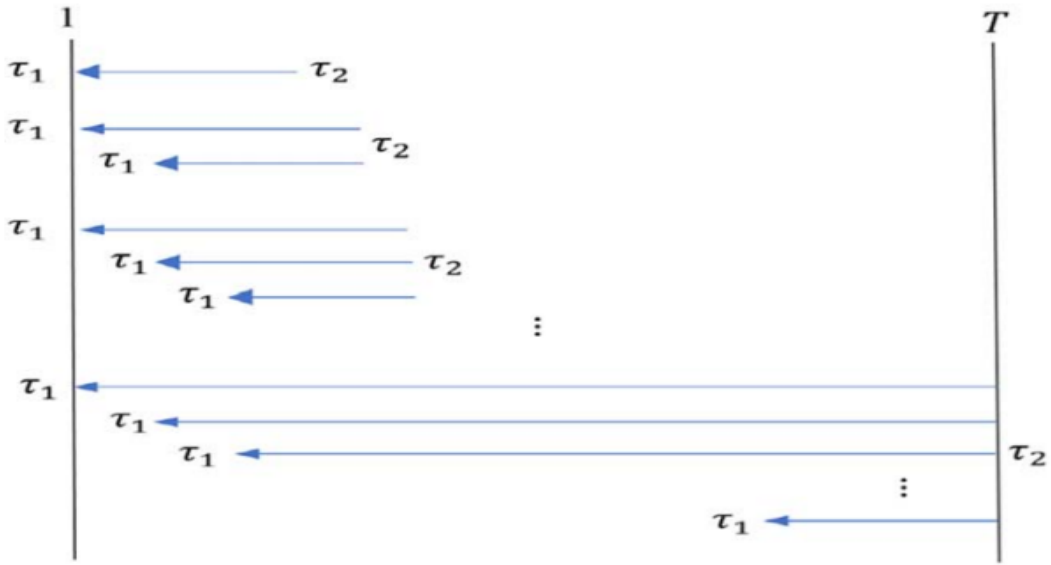
$$SW_f(f_0) = \sup_{f_2=f, f_1 \in [0, f_2 - f_0]} W_{f_1}^{f_2} \quad (1)$$

Zamanla değişen nedensel ilişkiler, başlangıç (f alt e) ve bitiş (f alt f) dönemleri tarafından belirlenir. Tek bir nedensel ilişkide bu dönemler aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\hat{f}_e = \inf_{f \in [f_0, 1]} \{f: SW_f(f_0) > scv\} \quad (2)$$

$$\hat{f}_f = \inf_{f \in [\hat{f}_e, 1]} \{f: SW_f(f_0) < scv\} \quad (3)$$

Burada scv SW_f istatistiğine karşılık gelen kritik değeri ifade etmektedir. SW_f istatistiği, Shi vd. (2020) tarafından ortaya konulan standart olmayan bir asimptotik dağılıma sahiptir.



Grafik 2. Yinelemeli Gelişen Pencere Algoritma
Kaynak: Emirmahmutoğlu vd. (2021); Topcu vd. (2021)

4. Bulgular

Bu çalışmanın amacı, pandemi sonrası temiz enerji ile yeşil teknoloji arasındaki nedensel ilişkinin zamanla değişen dinamiklerini ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, ampirik analize geçmeden önce zaman serilerinin durağanlık özellikleri incelenmiştir. Durağanlık analizinde, literatürde yaygın olarak kullanılan iki farklı birim kök testi uygulanmıştır. Bunlardan ilki Dickey ve Fuller (1981) tarafından geliştirilen Genişletilmiş Dickey-Fuller (ADF) testi, ikincisi ise Phillips ve Perron (1988) tarafından önerilen Phillips-Perron (PP) testidir. Tablo 2’de raporlanan birim kök testi sonuçları, analiz kapsamında ele alınan değişkenlerin seviyelerinde durağan olmadığını, ancak birinci farkları alındığında durağan hale geldiklerini göstermektedir. Dolayısıyla, söz konusu değişkenlerin $I(1)$ bütünleşme derecesine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu bulgu, izleyen aşamada uygulanacak nedensellik analizleri için uygun bir temel oluşturmaktadır.

Tablo 2. Birim Kök Testi Sonuçları

Değişkenler	I(0)		I(1)	
	ADF	PP	ADF	PP
Temiz Enerji	-1.96	-1.74	-8.55***	-33.41***
Yeşil Teknoloji	-1.26	-1.09	-10.89***	-37.03***

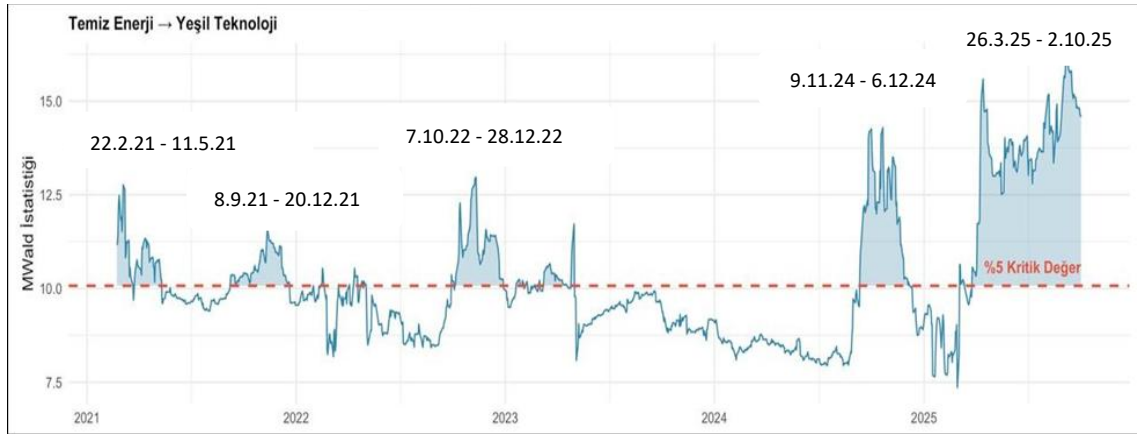
Not: *** %1 anlamlılık düzeyini temsil etmektedir. Optimal gecikme uzunluğu, Akaike bilgi kriteri dikkate alınarak belirlenmiştir.

Sonraki aşamada, incelenen değişkenler arasındaki nedensellik ilişkisi Shi vd. (2018) ve Shi vd. (2020) tarafından önerilen zamanla değişen Granger nedensellik yaklaşımı kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz, Granger nedensellik ilişkisinin zaman içinde nasıl

evrildiğini ortaya koymak amacıyla tekrarlamalı gelişen pencereli yöntem çerçevesinde gerçekleştirilmiştir².

Grafik 3, COVID-19 ve sonrasındaki dönemde temiz enerjiden yeşil teknolojiye doğru olan nedensellik ilişkisini göstermektedir. Grafiğe göre, temiz enerjiden yeşil teknolojiye doğru olan nedenselliğin %5 anlamlılık düzeyinde yalnızca belirli alt dönemlerde istatistiksel olarak anlamlı hale gelmektedir. Grafik, 2021 yılında pandemi sonrası erken toparlanma sürecinde, temiz enerjiden yeşil teknolojiye doğru nedensel ilişkinin kısa süreli ancak belirgin biçimde ortaya çıktığını göstermektedir. 2022 ve 2023 yıllarında ise nedenselliğin daha çok kesintili ve geçici bir yapı sergilediği, ilişkinin konjonktürel koşullara duyarlı olduğu görülmektedir. Bu görünüm, küresel enerji piyasalarında artan belirsizlikler, jeopolitik gelişmeler ve enerji fiyatlarındaki oynaklık ile uyumlu bir tablo sunmaktadır.

Buna karşılık, 2024 yılının sonlarına doğru nedensel ilişkinin yeniden güçlenmeye başladığı, 2025 yılı boyunca ise bu ilişkinin daha güçlü ve süreklilik gösteren bir yapı sergilediği görülmektedir. Bu bulgu, pandemi sonrası dönemin ilerleyen safhalarında temiz enerji alanındaki politika sürekliliğinin ve yapısal dönüşümün, yeşil teknoloji yatırımlarını daha güçlü biçimde desteklenmeye başladığını işaret etmektedir. Genel olarak, bulgular COVID-19 sonrası dönemde temiz enerjinin yeşil teknolojinin uzun dönemli dinamikleri açısından önemli bir belirleyici olduğunu; ancak bu etkinin dönemler itibarıyla değişkenlik gösteren ve homojen olmayan bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Grafik 3. Temiz Enerjiden Yeşil Teknolojiye Doğru Zamanla Değişen Granger Nedenselliği

Yeşil teknolojiye doğru olan nedensellik ilişkisine ilişkin bulgular Grafik 4'te sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, elde edilen MWald test istatistiklerinin, tüm örneklem dönemi boyunca %5 kritik değerinin altında kaldığı görülmektedir. Bu durum,

² Analiz başlangıçta toplam gözlem sayısının %20'sini oluşturan minimum pencere genişliği ile başlamakta ve her bir adımda örnekleme yeni gözlemler eklenerek bilgi seti kademeli biçimde genişletilmektedir. Böylece, değişkenler arasındaki nedensellik ilişkisi dinamik olarak izlenebilmektedir. Gecikme uzunluğu Akaike bilgi kriteri göz önüne alınarak 6 olarak belirlenmiştir. Elde edilen Wald testi istatistiklerinin istatistiksel anlamlılığı, 1000 tekrar içeren bootstrap yöntemi ile elde edilen kritik değerler üzerinden değerlendirilmiştir.

pandemi sonrası dönemde yeşil teknolojiye gelişmelerin temiz enerji dinamikleri üzerinde zamanla değişen ve istatistiksel olarak anlamlı bir Granger nedensellik ilişkisi üretmediğini göstermektedir. Elde edilen bu bulgu, yeşil teknolojinin temiz enerji üzerindeki etkisinin örneklem dönemi boyunca doğrudan ve güçlü bir nedensel mekanizma aracılığıyla işlemediğine işaret etmektedir. Başka bir ifadeyle, yeşil teknolojiye ilerlemeler temiz enerjiye yönelik dönüşümün başlıca itici gücü olmaktan ziyade, bu süreci destekleyen tamamlayıcı ve dolaylı bir işlev görmektedir.



Grafik 4. Yeşil Teknolojiden Temiz Enerjiye Doğru Zamanla Değişen Granger Nedenselliği

5. Sonuç

Bu çalışma, COVID-19 ve sonrası dönemde temiz enerji ile yeşil teknoloji arasındaki ilişkiyi incelemektedir. Bu amaçla, 2 Ocak 2020 – 2 Ekim 2025 dönemine ait günlük veriler kullanılarak Shi vd. (2018; 2020) tarafından geliştirilen zamanla değişen Granger nedensellik yöntemi uygulanmıştır. Geleneksel Granger testlerinin nedenselliği zaman boyunca sabit kabul etmesi, kısa süreli etkileşimlerin ortaya çıkmasını zorlaştırabilmektedir (Madaleno vd., 2022; Emirmahmutoğlu vd., 2021). COVID-19 gibi küresel şokların piyasalarda daha dalgali bir yapı oluşturması da nedenselliğin zaman içerisinde değişebileceğine işaret etmektedir. Bu nedenle çalışmada, ilişkinin hangi dönemlerde güçlenip hangi dönemlerde zayıfladığını daha net bir şekilde ortaya koyabilen zamanla değişen nedensellik yaklaşımı tercih edilmiştir.

Analiz sonuçları, temiz enerjiden yeşil teknolojiye doğru nedenselliğin %5 anlamlılık düzeyinde yalnızca belirli alt dönemlerde ortaya çıktığını ve bu ilişkinin tüm örneklem boyunca sürekli bir yapı sergilemediğini göstermektedir. Bu bulgu, pandemi sonrası dönemde temiz enerjinin yeşil teknolojiler üzerindeki etkisinin zamana ve koşullara bağlı olarak değiştiğini ve dönemsel bir nitelik taşıdığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, yeşil teknolojiye doğru kurulan nedensellik hipotezine ilişkin bulgular, bu yönde istatistiksel olarak anlamlı bir zamanla değişen nedensellik ilişkisi bulunmadığını ortaya koymaktadır. Bu asimetrik yapı, pandemi sonrası enerji dönüşüm sürecinde nedenselliğin yönünün tek taraflı ve zamana duyarlı olduğunu göstermektedir.

Yeşil teknolojiden temiz enerjiye doğru nedensellik ilişkisinin bulunmaması çeşitli iktisadi dinamiklerle açıklanabilir. Öncelikle, yeşil teknoloji yatırımlarının yüksek başlangıç maliyetleri ve finansman sınırlılıkları nedeniyle bu alandaki yeniliklerin enerji piyasalarına yansması zaman alabilmekte ve teknolojik gelişmelerin etkisi gecikmeli olarak ortaya çıkabilmektedir. Nitekim, mevcut literatür yeşil teknolojilerin yaygınlaşmasının önündeki finansman kaynaklı engelleri açık biçimde ortaya koymaktadır (Eyraud vd., 2011; Shi vd., 2025). Ayrıca, ölçek ekonomilerinin ancak uzun vadede oluşması ve pandemi sonrası dönemde yaşanan arz zinciri bozulmalarının temiz enerji ekipman maliyetlerini artırması, teknolojik yeniliklerin temiz enerji kapasitesine kısa vadede yansmasını sınırlandırmış olabilir. Belirsizlik ortamında firmaların risk iştahının düşmesi de yenilikçi yatırımların ertelenmesine yol açarak teknolojik gelişmelerin enerji üretim maliyetlerini düşürücü etkisinin gecikmesine neden olabilmektedir (Yoshino ve Taghizadeh-Hesary, 2019). Bu mekanizmalar birlikte ele alındığında, pandemi sonrası dönemde gözlenen tek yönlü ve dönemsel nedensellik deseninin iktisadi arka planı daha anlaşılır hâle gelmektedir.

Çalışmanın bulguları, literatürde yer alan zamanla değişen nedensellik çalışmalarını tamamlayıcı nitelik taşımaktadır. Nitekim Madaleno vd. (2022), 2014-2021 dönemi günlük verileri kullanarak yaptığı analizlerde temiz enerji ile yeşil teknoloji arasında dönemsel dalgalanmalar içeren bir ilişki tespit etmiş ve temiz enerjiden yeşil teknolojiye doğru olan nedenselliğin daha sık ve görece güçlü olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmanın COVID-19 ve sonrası döneme odaklanan sonuçları ise, söz konusu ilişkinin pandemi sonrası dönemde daha kırılğan ve dalgalı bir yapıya evrildiğini göstererek literatürü zaman boyutunda ileri taşımaktadır.

Politika çıkarımları açısından değerlendirildiğinde, elde edilen bulgular temiz enerjiye yönelik uzun vadeli, öngörülebilir ve istikrarlı politikaların yeşil teknolojik gelişmeler açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, yeşil finansman, kamu destekli yönlendirici politikalar ve düzenleyici çerçevelerin enerji dönüşümündeki rolünü vurgulayan önceki çalışmalarla uyumludur (Sachs vd., 2019; Zadek ve Zhang, 2014; Taghizadeh-Hesary ve Yoshino, 2019). Temiz enerji yatırımlarındaki süreklilik, yeşil teknolojilerin ölçek kazanmasını destekleyerek sürdürülebilir bir inovasyon ekosisteminin oluşmasına katkı sağlamaktadır. Nitekim sürdürülebilir kalkınma hedeflerine, yeşil teknoloji inovasyonu yoluyla ulaşılabileceği ve bu sürecin doğal çevre üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılmasını teşvik ettiği literatürde açık biçimde vurgulanmaktadır (Luo vd., 2019). Buna karşılık, yeşil teknolojilerden temiz enerjiye doğru istatistiksel olarak anlamlı bir nedensellik ilişkisinin gözlenmemesi, politika müdahalelerinin tek başına teknolojik yeniliklere odaklanmasının yeterli olmadığını göstermektedir. Literatürde de vurgulandığı üzere, kriz ve belirsizlik dönemlerinde enerji-teknoloji etkileşimleri geçici olarak güçlenebilmekte, ancak bu etkileşimler çoğu zaman kalıcı bir yapıya dönüşmemektedir (Hammoudeh vd., 2020; Madaleno vd., 2022; Shahbaz vd., 2021). Bu nedenle, yeşil teknolojik yeniliklerin temiz enerji dönüşümüne kalıcı katkı sunabilmesi için düzenleyici çerçevelerin güçlendirilmesi ve finansal teşviklerin sürekliliği büyük önem taşımaktadır. Genel olarak bu çalışma, temiz enerji ile yeşil teknoloji arasındaki ilişkinin zamana duyarlı yapısının dikkate alınmasının hem ampirik analizler hem de enerji politikalarının tasarımı açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır. Bulgular, pandemi

sonrası sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılabilmesi için temiz enerjiyi merkeze alan ve yeşil teknolojileri bu yapı üzerinden destekleyen bütüncül politika stratejilerinin gerekliliğine işaret etmektedir.

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Öncelikle, analiz kapsamında ele alınan nedensellik ilişkileri COVID-19 salgını ve sonrasındaki dönemle sınırlandırılmıştır. Bu durum, bulguların pandemi öncesi döneme genellenebilirliğini sınırlamaktadır. Gelecekteki çalışmalar, daha uzun bir zaman dilimini kapsayarak pandemi öncesi ve sonrası dönemleri karşılaştırmalı biçimde ele alabilir ve böylece yapısal kırılmaların nedensellik ilişkileri üzerindeki etkisini daha kapsamlı biçimde inceleyebilir. Bunun yanı sıra, bu çalışmada temiz enerji ve yeşil teknoloji değişkenleri arasındaki ilişkiye odaklanılmıştır. Oysa sürdürülebilirlik literatürü, çevresel bozulma ve iklim değişikliğini etkileyen karbon emisyonları, çevresel sorumluluk, yeşil finansman ve makroekonomik göstergeler gibi çok sayıda değişkenin bu süreçte rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda daha kapsamlı değişken setlerinin kullanılması ve çok boyutlu analizlerin benimsenmesi, elde edilecek bulguların politika yapım sürecine katkısını artıracaktır. Son olarak, zamanla değişen nedensellik yaklaşımlarının farklı frekanstaki veriler (haftalık veya aylık) ile test edilmesi, bulguların sağlamlığını değerlendirmek açısından önemli bir katkı sunabilir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Etik kurul izni ve/veya yasal/özel izin alınmasına gerek olmayan bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazar, makalenin tamamına yalnız kendisinin katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Araştırmacıların Çıkar Çatışması Beyanı

Bu çalışmada herhangi bir potansiyel çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yapay Zekâ Kullanım Beyanı

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında yazar herhangi bir yapay zekâ aracından faydalanmamıştır.

Kaynakça

- Ali, M.I., Rahaman, M.A. and Ali, M.J. (2025). Green versus non-green technology innovation and environmental quality: Cointegration and counterfactual analysis. *Humanities and Social Sciences Communications*, 12(1): 1-15.
- Aydin, M., Sogut, Y. and Erdem, A. (2024). The role of environmental technologies, institutional quality, and globalization on environmental sustainability in European Union countries: New evidence from advanced panel data estimations. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(7): 10460-10472.
- Chen, J., Huang, S. and Kamran, H.W. (2023). Empowering sustainability practices through energy transition for sustainable development goal 7: The role of energy patents and natural resources among European Union economies through advanced panel. *Energy Policy*, 176: 113499.
- Dickey, D.A. and Fuller, W.A. (1981). Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 49(4): 1057-1072.
- Dogan, B., Nketiah, E., Ghosh, S. and Nassani, A. A. (2025). The impact of the green technology on the renewable energy innovation: Fresh pieces of evidence under the role of research & development and digital economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 210: 115193.
- Emirmahmutoglu, F., Denaux, Z. and Topcu, M. (2021). Time-varying causality between renewable and non-renewable energy consumption and real output: Sectoral evidence from the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149: 111326.
- Eyraud, L., Wane, M.A., Zhang, M.C. and Clements, M.B.J. (2011). *Who's going green and why? Trends and determinants of green investment* (IMF Working Paper No.11/296).
- Fang, Z. (2023). Assessing the impact of renewable energy investment, green technology innovation, and industrialization on sustainable development: A case study of China. *Renewable Energy*, 205: 772-782.
- Hammoudeh, S., Ajmi, A.N. and Mokni, K. (2020). Relationship between green bonds and financial and environmental variables: A novel time-varying causality. *Energy Economics*, 92: 104941.
- Han, J., Xie, D., Ahmed, Z., Khan, S. and Kirikkaleli, D. (2023). Green technologies, government stability, and green energy transition in a globalized world: Evidence from E-7 nations. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(40): 92255-92266.
- Huo, C., Hameed, J., Alqhtani, H.A., Fatemah, A. and Dar, A.A. (2025). Intrinsic role of green technologies and renewable energy: A pathway to mitigate climate change in China. *Geological Journal*. 60(11): 2808-2824.
- Ikram, M., Ferasso, M., Sroufe, R. and Zhang, Q. (2021). Assessing green technology indicators for cleaner production and sustainable investments in a developing country context. *Journal of Cleaner Production*, 322: 129090.
- Khurshid, A., Huang, Y., Khan, K. and Cifuentes-Faura, J. (2024). Innovation, institutions, and sustainability: Evaluating drivers of household green technology adoption and environmental sustainability of Africa. *Gondwana Research*, 132: 88-102.
- Kwilinski, A., Lyulyov, O. and Pimonenko, T. (2024). Reducing transport sector CO2 emissions patterns: Environmental technologies and renewable energy. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(1): 100217.
- Luo, Q., Miao, C., Sun, L., Meng, X. and Duan, M. (2019). Efficiency evaluation of green technology innovation of China's strategic emerging industries: An empirical analysis based on Malmquist-data envelopment analysis index. *Journal of Cleaner Production*, 238: 117782.

- Madaleno, M., Dogan, E. and Taskin, D. (2022). A step forward on sustainability: The nexus of environmental responsibility, green technology, clean energy and green finance. *Energy Economics*, 109: 105945.
- Mahou, Y., Ben Youssef, S. and Ben Jebli, M. (2022). Inspecting the influence of renewable energy and R&D in defending environmental quality: evidence for California. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(59): 88751-88762.
- Murshed, M., Ahmed, Z., Alam, M.S., Mahmood, H., Rehman, A. and Dagar, V. (2021). Reinvigorating the role of clean energy transition for achieving a low-carbon economy: Evidence from Bangladesh. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(47): 67689-67710.
- Pata, U.K., Caglar, A.E., Kartal, M.T. and Depren, S.K. (2023). Evaluation of the role of clean energy technologies, human capital, urbanization, and income on the environmental quality in the United States. *Journal of Cleaner Production*, 402: 136802.
- Phillips, P.C.B. and Perron, P. (1988). Testing for a unit root in time series regression. *Biometrika*, 75(2): 335-346.
- Piprani, A.Z., Nazir, S., Poon, W.C., Ali, M. and Tehseen, S. (2025). Eco-transformation: Shaping the future of manufacturing with green technologies and cleaner production-practices. *Geological Journal*, 60(6): 1474-1487.
- Sachs, J.D., Woo, W.T., Yoshino, N. and Taghizadeh-Hesary, F. (2019). *Why is green finance important?* (ADB Working Paper No. 917). Retrieved from <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/481936/adb-wp917.pdf>
- Sahin, G., Aydin, H.I. and Ozdemir, A. (2025). The relationship between energy and climate action in the context of sustainable development goals: An empirical analysis of BRICS-T economies. *Sustainability*, 17(18): 8271.
- Shahbaz, M., Trabelsi, N., Tiwari, A.K., Abakah, E.J.A. and Jiao, Z. (2021). Relationship between green investments, energy markets, and stock markets in the aftermath of the global financial crisis. *Energy Economics*, 104: 105655.
- Shan, S., Genç, S.Y., Kamran, H.W. and Dinca, G. (2021). Role of green technology innovation and renewable energy in carbon neutrality: A sustainable investigation from Turkey. *Journal of Environmental Management*, 294: 113004.
- Shi, S., Phillips, P.C. and Hurn, S. (2018). Change detection and the causal impact of the yield curve. *Journal of Time Series Analysis*, 39(6): 966-987.
- Shi, S., Hurn, S. and Phillips, P.C. (2020). Causal change detection in possibly integrated systems: Revisiting the money-income relationship. *Journal of Financial Econometrics*, 18(1): 158-180.
- Shi, Z., Li, B. and Bilti, R.S. (2025). Constraints to sustainable energy technology implementation: Insights from an emerging economy using ISM-MICMAC analysis. *PLoS One*, 20(9): e0331334.
- Sun, Y., Li, H., Zhang, K. and Kamran, H. W. (2022). Dynamic and casual association between green investment, clean energy and environmental sustainability using advance quantile ARDL framework. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, 35(1): 3609-3628.
- Taghizadeh-Hesary, F. and Yoshino, N. (2019). The way to induce private participation in green finance and investment. *Finance Research Letters*, 31: 98-103.
- Topcu, M., Yagli, I. and Emirmahmutoglu, F. (2021). COVID-19 and stock market volatility: A time-varying perspective. *Economics Bulletin*, 41(3): 1681-1689.
- Uche, E., Okere, K.I. and Ngpah, N. (2025). After the Johannesburg II Declaration, What Next for Ecological Sustainability in BRICS? Perspectives on Green Innovations and Green Transitions. *Sustainable Development*, 33(3): 4348-4365.

- Usman, A., Ullah, S., Ozturk, I., Chishti, M.Z. and Zafar, S.M. (2020). Analysis of asymmetries in the nexus among clean energy and environmental quality in Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(17): 20736-20747.
- Yoshino, N. and Taghizadeh-Hesary, F. (2019). Optimal credit guarantee ratio for small and medium-sized enterprises' financing: Evidence from Asia. *Economic Analysis and Policy*, 62: 342-356.
- Yoshino, N., Taghizadeh-Hesary, F. and Nakahigashi, M. (2019). Modelling the social funding and spill-over tax for addressing the green energy financing gap. *Economic Modelling*, 77: 34-41.
- Yu, Z., Kamran, H.W., Amin, A., Ahmed, B. and Peng, S. (2023). Sustainable synergy via clean energy technologies and efficiency dynamics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187: 113744.
- Zadek, S. and Zhang, C. (2014). *Greening China's financial system: An initial exploration*. International Institute for Sustainable Development.