



JOEEP

e-ISSN: 2651-5318
Journal Homepage: <http://dergipark.org.tr/joeep>



Araştırma Makalesi • Research Article

ABD’de Yenilenebilir Enerji Türlerinin CO₂ Emisyonları Üzerindeki Etkisi: Spektral Nedensellik Analizi

The Impact of Renewable Energy Types on CO₂ Emissions in the United States: A Spectral Causality Analysis

Serkan Cantürk^{a, *}

^a Dr. Öğr. Üyesi, İstinye Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 34396, İstanbul / Türkiye
ORCID: 0000-0002-7283-7227

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Başvuru tarihi: 22 Nisan 2026

Düzeltilme tarihi: 4 Haziran 2026

Kabul tarihi: 4 Haziran 2026

Anahtar Kelimeler:

İklim değişikliği

Yenilenebilir Enerji Tüketimi

CO₂ Emisyonları

Spektral Nedensellik Analizi

ARTICLE INFO

Article history:

Received: April 22, 2026

Received in revised form: June 4, 2026

Accepted: June 4, 2026

Keywords:

Climate Change

Renewable Energy Consumption

CO₂ Emissions

Spectral Causality Analysis

ÖZ

İklim değişikliği ve küresel ısınma, fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılmasını ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışma, ABD’de biyoyakıt, hidroelektrik, atık, odun ve güneş enerjisi temelli yenilenebilir enerji tüketimi ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi 1984:01-2025:09 dönemi için spektral nedensellik yaklaşımıyla incelemektedir. Spektral nedensellik bulguları, ilişkinin frekans bantları boyunca homojen olmadığını ve zaman ufkuyla ilgili olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, CO₂ emisyonlarından yenilenebilir enerji tüketimine doğru nedensellik tüm enerji türlerinde daha güçlü ve geniş frekans bantlarında ortaya çıkmaktadır. Buna karşılık, yenilenebilir enerji tüketiminden CO₂ emisyonlarına doğru nedensellik daha sınırlı ve enerji türüne bağlı olarak farklılaşmaktadır. Özellikle biyoyakıt ve güneş enerjisinin etkisinin uzun dönemli olduğu; hidroelektrik ve atık temelli enerjinin kısa dönemli dalgalanmalara daha duyarlı olduğu; odun temelli enerjinin ise düzensiz bir yapı sergilediği belirlenmiştir. Bulgular, çevresel baskıların enerji tercihlerini yönlendirdiğini ve enerji-çevre ilişkisinin çok boyutlu bir çerçevede ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çerçevede, enerji ve iklim politikalarının zaman ufkuyla duyarlı ve kaynak türüne özgü olarak tasarlanması önerilmektedir.

ABSTRACT

Climate change and global warming necessitate reducing dependence on fossil fuels and increasing the share of renewable energy sources. This study examines the relationship between renewable energy consumption, specifically biofuels, hydroelectric, waste, wood, and solar energy, and CO₂ emissions in the United States over the period 1984:01–2025:09 using a spectral causality approach. The findings reveal that the relationship is not homogeneous across frequency bands and varies significantly depending on the time horizon. The results indicate that causality running from CO₂ emissions to renewable energy consumption is stronger and observed over a wider range of frequencies across all energy types. In contrast, the causal relationship between renewable energy consumption and CO₂ emissions is less clear and varies by energy source. In particular, the effects of biofuels and solar energy are more pronounced in the long run, whereas hydroelectric and waste-based energy are more sensitive to short-term fluctuations. Wood-based energy exhibits a more irregular and frequency-dependent pattern. Overall, the findings suggest that environmental pressures play a decisive role in shaping energy preferences and highlight the importance of analyzing the energy-environment nexus within a multidimensional framework. Accordingly, energy and climate policies should be designed with sensitivity to different time horizons and tailored to specific energy sources.

1. Giriş

Küresel ölçekte hız kazanan iklim değişikliği ve buna bağlı olarak artan çevresel riskler, ekonomik büyüme modellerinin enerji temelli yapısını yeniden düşünmeyi zorunlu kılmaktadır (IPCC, 2023). Sanayi devriminden

itibaren ekonomik faaliyetlerin büyük ölçüde fosil yakıtlara dayanması, karbondioksit (CO₂) emisyonlarında hızlı bir artışa yol açmış ve atmosferik karbon yoğunluğunu tarihsel olarak eşi görülmemiş seviyelere taşımıştır (IEA, 2022). Bu gelişme yalnızca çevresel sürdürülebilirliği değil, aynı

* Sorumlu yazar/Corresponding author.

e-posta: serkan.canturk@istinye.edu.tr

Atf/Cite as: Cantürk, S. (2026). ABD’de Yenilenebilir Enerji Türlerinin CO₂ Emisyonları Üzerindeki Etkisi: Spektral Nedensellik Analizi. *Journal of Emerging Economies and Policy*, 11(1), 415-428.

This article is published under the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) licence. Anyone may reproduce, distribute, translate and create derivative works of this article (for both commercial and non-commercial purposes), subject to full attribution to the original publication and authors.

zamanda uzun dönemli makroekonomik istikrarı, halk sağlığını ve küresel refahı da tehdit eden çok boyutlu sorunlara yol açmaktadır (Nordhaus, 2017).

Yenilenebilir enerji kaynakları, düşük karbonlu üretim yapıları sayesinde iklim değişikliğiyle mücadelede temel araçlardan biri olarak görülmektedir (Sadorsky, 2009). Özellikle güneş enerjisi, hidroelektrik enerji ve biyokütle temelli enerji kaynakları, hem karbon yoğunluğu düşük üretim süreçleri sunmakta hem de enerji arz güvenliğini güçlendirerek dışa bağımlılığı azaltmaktadır (IEA, 2022). Bununla birlikte, yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi her ülke ve her enerji türü için homojen bir etki göstermemektedir. Enerji altyapısı, teknolojik gelişmişlik düzeyi, sanayi yapısı ve çevre politikalarının niteliği bu ilişkinin yönünü ve büyüklüğünü önemli ölçüde belirlemektedir (Pata, 2018).

Bu çalışmanın teorik temelleri üç ana yaklaşım üzerine dayanmaktadır. İlk olarak, Çevresel Kuznets Eğrisi (Environmental Kuznets Curve-EKC) hipotezi, ekonomik büyümenin ilk aşamalarında enerji talebi ve üretim faaliyetlerindeki genişlemeye bağlı olarak çevresel bozulmanın arttığını, ancak belirli bir gelir düzeyinden sonra teknolojik gelişme, çevre bilincinin yükselmesi ve daha sıkı çevre politikalarının etkisiyle emisyonların azalmaya başladığını ileri sürmektedir (Grossman ve Krueger, 1991; Stern, 2004). İkinci olarak, teknolojik dönüşüm yaklaşımı, araştırma-geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerinin enerji verimliliğini artırarak ve düşük karbonlu teknolojilerin yaygınlaşmasını sağlayarak çevresel performansını iyileştirdiğini savunmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelik Ar-Ge yatırımları, enerji üretim süreçlerinin karbon yoğunluğunu azaltmakta ve sürdürülebilir büyümeyi desteklemektedir (Popp, 2002; Acemoglu vd., 2012). Üçüncü olarak, enerji dönüşüm teorisi, fosil yakıt temelli enerji sistemlerinden yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin yalnızca teknolojik bir değişim değil, aynı zamanda ekonomik, kurumsal ve toplumsal yapıları dönüştüren uzun dönemli bir süreç olduğunu vurgulamaktadır (Sovacool, 2016). Bu teorik çerçeveler birlikte değerlendirildiğinde, artan çevresel baskıların yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik ettiği, teknolojik ilerlemenin enerji sistemlerinin karbon yoğunluğunu azalttığı ve enerji dönüşüm sürecinin uzun dönemde CO₂ emisyonlarının kontrol altına alınmasında kritik bir rol oynadığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, yenilenebilir enerji türleri ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkinin incelenmesi, yalnızca enerji tüketim tercihlerinin değil, aynı zamanda ekonomik büyüme, teknolojik yenilik ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki dinamik etkileşimin de değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Literatürde yenilenebilir enerji ve karbondioksit emisyonu ilişkisini inceleyen çok sayıda ampirik çalışma bulunmaktadır. Apergis ve Payne (2014), panel veri analizi kullanarak yenilenebilir enerji tüketiminin uzun dönemde CO₂ emisyonlarını azalttığını ortaya koyarken, Bilgili vd. (2016) bu ilişkinin doğrusal olmayan bir yapıya sahip

olabileceğini göstermektedir. Destek ve Aslan (2017) ve Destek ve Sinha (2020) ise yenilenebilir enerji türleri arasında çevresel etkinin farklılaştığını ve özellikle biyokütle temelli kaynakların kısa dönemde sınırlı emisyon azaltıcı etki yaratabildiğini vurgulamaktadır. Bu bulgular, yenilenebilir enerjinin tek başına homojen bir politika aracı olarak değerlendirilmesinin yanıltıcı olabileceğine işaret etmektedir.

Bu noktada, enerji piyasalarının büyüklüğü ve küresel emisyonlar içindeki payı nedeniyle Amerika Birleşik Devletleri (ABD) özel bir önem taşımaktadır. ABD, 2024 yılı verilerine göre Çin ve Hindistan'dan sonra dünyanın en büyük CO₂ salıcıları arasında yer almaktadır (Energy Institute, 2026). Aynı zamanda son yirmi yılda yenilenebilir enerji yatırımlarını hızlandıran ülkelerin başında gelmektedir. Özellikle biyoyakıt üretimi, hidroelektrik kapasitesi ve atık bazlı enerji dönüşüm projeleri açısından dünya ölçeğinde belirleyici bir aktördür (IRENA ve CPI, 2025). Bu nedenle ABD örneğinde yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerinin ayrıntılı biçimde analiz edilmesi, yalnızca ulusal politika tasarımı açısından değil, küresel iklim politikalarının yönü açısından da kritik önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, ABD'de yenilenebilir enerji türlerinin tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki kısa, orta ve uzun dönemli etkilerinin ampirik olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada, 1984:01–2025:09 dönemini kapsayan uzun bir zaman aralığında aylık verilerle spektral nedensellik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu yönüyle analiz, enerji-çevre ilişkisinin yalnızca statik bir çerçevede değil, dinamik geri besleme mekanizmalarıyla birlikte değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

Elde edilen bulgular, CO₂ emisyonları ile yenilenebilir enerji türleri arasındaki ilişkinin frekans boyunca homojen olmadığını ve zaman ufkuna bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymaktadır. Spektral nedensellik sonuçları, CO₂ emisyonlarından yenilenebilir enerji tüketimine doğru nedenselliğin tüm enerji türlerinde daha güçlü ve daha geniş frekans bantlarında gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durum, çevresel baskılar ve karbon azaltım politikalarının enerji tercihlerini şekillendirmede belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, yenilenebilir enerji türlerinin tüketiminden CO₂ emisyonlarına doğru nedensellik daha sınırlı ve enerji türüne bağlı olarak farklılaşmaktadır. Özellikle biyoyakıt ve güneş enerjisinin etkisinin daha çok uzun dönemli ve yığılmı olduğu; hidroelektrik ve atık temelli enerjinin kısa dönemli dalgalanmalara daha duyarlı olduğu; odun temelli enerjinin ise düzensiz ve frekansa bağlı bir yapı sergilediği belirlenmiştir. Bu bulgular, enerji politikalarının yalnızca emisyon azaltım hedeflerine odaklanmakla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda enerji bileşiminin zaman ufkuna duyarlı ve kaynak türüne özgü dönüşümünü de içermesi gerektiğini göstermektedir.

Çalışmanın literatüre katkısı üç açıdan öne çıkmaktadır. İlk olarak, toplam yenilenebilir enerji tüketimi yerine farklı

yenilenebilir enerji türlerinin ayrıştırılarak analiz edilmesi, her bir enerji kaynağına özgü dinamiklerin ortaya konulmasına ve daha kaynak hedefli politika çıkarımlarının yapılmasına olanak sağlamaktadır. İkinci olarak, uzun dönemli ve yüksek frekanslı veri setinin kullanılması ile analizlerin gerçekleştirilmesi, değişkenler arasındaki ilişkinin farklı zaman ölçeklerinde incelenmesine imkân tanıyarak bulguların metodolojik açıdan derinliğini ve güvenilirliğini artırmaktadır. Üçüncü olarak ise, elde edilen sonuçların sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlama perspektifiyle değerlendirilmesi, çalışmanın sonuçlarının politika tartışmalarına doğrudan katkı sunması hedeflenmektedir.

ABD özelinde elde edilen bulgular, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'nın özellikle “*Temiz ve Erişilebilir Enerji*” (SKH7) ve “*İklim Eylemi*” (SKH13) (UNDP, 2015) hedeflerine ulaşılmasına katkı sunmaktadır. Ayrıca bu sonuçlar, gelişmekte olan ülkeler açısından önemli dersler içermektedir. Kısa vadede yenilenebilir enerji yatırımlarının maliyetli görünmesine karşın, uzun vadede emisyon azaltımı ve çevresel kalite artışı yoluyla ekonomik ve sosyal refahı destekleyebileceği ortaya konulmaktadır (Stern, 2007; Destek ve Sinha, 2020). Bu yönüyle çalışma, gelişmekte olan ülkelerin enerji dönüşüm süreçlerinde yalnızca büyüme odaklı değil, çevresel sürdürülebilirliği merkeze alan kısa ve uzun dönemli politikaların geliştirilmesi gerektiğine dair önemli kanıtlar sunmaktadır.

Çalışmada giriş bölümünden sonra literatür incelemesine yer verilmekte ve veri ve metodoloji kısmından sonra analiz ve bulgular tartışılmaktadır. Nihai aşamada sonuç ve değerlendirmeler yer almaktadır.

2. Literatür İncelemesi

Yenilenebilir enerji ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişki, iklim değişikliğiyle mücadelede enerji politikalarının rolünü anlamak açısından çevre ekonomisi literatürünün en yoğun incelenen başlıklarından biridir. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri (ABD), hem dünyanın en büyük enerji tüketicilerinden biri olması hem de küresel karbon emisyonları içindeki yüksek payı nedeniyle, bu ilişkinin ampirik olarak test edilmesinde temel bir referans ülke konumundadır (Sadorsky, 2009; IEA, 2022). Tablo 1 literatür incelemesi kapsamında incelenen çalışmaları göstermektedir.

Tablo 1: Literatür İncelemesi

Yazar(lar)	Veri Seti	Yöntem	Temel Bulgular
Dogan ve Ozturk (2017)	1960-2010	ARDL	Yenilenebilir tüketim CO ₂ 'yi azaltmaktadır.
Bilgili (2012)	1960-2009	ARDL	Yenilenebilir enerji tüketimindeki artış uzun dönemde zayıf

Bilgili vd., (2016)	1977-2010	Panel FMOLS ve Panel DOLS Analizleri	azaltıcı etki bulunmaktadır. Yenilenebilir enerjinin CO ₂ emisyonları üzerinde olumsuz etki oluşturduğunu göstermektedir.
Pata (2018)	1974-2014	FMOLS ve CCR Analizi	Toplam yenilenebilir enerjinin, hidroelektrik tüketimi ve alternatif enerji tüketiminin ise CO ₂ emisyonları üzerinde hiçbir etkisi olmadığını göstermiştir.
Zuhal ve Göcen (2025)	1973:01-2022:06	Spektral Nedensellik Analizi	Orta ve uzun dönemde karşılıklı nedensellik tespit edilmiştir.
Salari vd., (2021)	1997-2016	50 eyalet düzeyinde Panel Veri Analizi	Eyalet düzeyinde çeşitli enerji tüketim türleri ile CO ₂ emisyonları arasında uzun vadeli bir ilişki olduğunu göstermektedir.
Burnett vd., (2013)	1981-2003	OLS	Ekonomik büyümenin emisyon yoğunluğunu etkilediğini göstermektedir.
Jeon (2022)	1997-2017	Panel quantile regresyon modelleri	Açıklayıcı değişkenlerin CO ₂ emisyonları üzerindeki etkilerinin farklı kantillerde heterojen olduğunu doğrulamaktadır.
Kim vd., (2020)	1973:01-2016:12	ARDL ve DAG Analizi	Toplam biyokütle enerji tüketimi ve GSYİH'nın toplam enerji CO ₂ emisyonları ile tek yönlü eşzamanlı nedenselliği ve ARDL sonuçlarına göre, kişi başına toplam biyokütle enerji tüketimi ile uzun vadede kişi başına toplam enerji CO ₂

			emisyonlarında azalmaya neden olduğu belirtilmektedir.
Grafton vd., (2014)	1981-2011	Dinamik Lineer Regresyon Analizi	Biyoyakıtların fosil yakıtlara kıyasla birim başına düşük düzeyde CO ₂ emisyonu azaltımı sağladığı tespit edilmiştir. Net CO ₂ emisyonlarına katkıda bulunmuş olabileceği vurgulanmaktadır.
DeCicco vd. (2016)	2005-2013	LCA Modellemesi	Biyoyakıtların karbon nötrlüğünü dengeleme varsayımının geçersiz olduğu vurgulanmaktadır.
Upton Jr. ve Snyder (2017)	1990-2013	RPS (Yenilenebilir Portfolyo Standartları) Analizi	Yenilenebilir enerji üretiminde artışın emisyon azaltımına dair zayıf kanıtlarının olduğu belirtilmektedir.
Greenstone vd., (2019)	1990-2016	RPS Analizi	Karbon emisyonlarındaki tahmini azalmanın kesin olmaması ile birlikte, karbonun azaltımının maliyetli hale geldiği belirtilmektedir.
Wiser vd., (2017)	2015-2050	RPS Analizi	Uzun dönemde faydalarının maliyetlerin üzerinde olabileceği belirtilmektedir.
Holland vd., (2022)	Saatlik veri	Marginal Analiz	Elektrik enerjisi tüketiminin karbon azaltımı üzerindeki etkisi, ABD'nin elektrik üretim kaynaklarına göre şekilleneceği vurgulanmaktadır.
Mai vd. (2018)	Simülasyon Analizi	Modelleme	Elektrik kullanımının artması emisyonların azaltılmasına

			güçlü fırsatlar sunduğu belirtilmektedir.
Payne vd., (2024)	1990-2018	Yakınsama Analizi	ABD'de eyaletler özelinde farklılaşmanın olduğu ve heterojen enerji politikalarının önemine vurgu yapılmaktadır.

ABD üzerine yapılan erken dönem çalışmalar ağırlıklı olarak zaman serisi yöntemlerine dayanmaktadır. Dogan ve Ozturk (2017), 1960-2010 dönemini kapsayan ARDL tabanlı çevresel Kuznets eğrisi analizinde, yenilenebilir enerji tüketiminin uzun dönemde CO₂ emisyonlarını anlamlı biçimde azalttığını tespit etmiştir. Aynı zamanda ekonomik büyümenin çevresel etkilerinin enerji bileşimi tarafından şekillendiğini ve yenilenebilir kaynakların karbon yoğun üretim yapısının dönüştürülmesinde kritik rol oynadığını vurgulamaktadırlar.

Bilgili vd. (2016) ise doğrusal olmayan ARDL yaklaşımını kullanarak bu ilişkinin simetrik olmadığını göstermiştir. Yenilenebilir enerji tüketimindeki artışların CO₂ emisyonları üzerinde güçlü bir azaltıcı etki yarattığı, ancak azalışların aynı büyüklükte ters etki üretmediği bulgusuna ulaşılmıştır. Bu sonuç, enerji dönüşümünün çevresel faydalarının asimetrik ve gecikmeli olabileceğini savunan teorik yaklaşımlarla uyumludur. Pata (2018) tarafından FMOLS ve DOLS yöntemleriyle gerçekleştirilen analiz de benzer biçimde yenilenebilir enerji tüketiminin uzun dönemde emisyonları düşürdüğünü, buna karşılık fosil yakıt tüketiminin güçlü biçimde artırıcı rol oynadığını ortaya koymaktadır. Zuhal ve Göcen (2025) simetrik analiz sonuçlarına göre, ABD'de CO₂ emisyonları, yenilenebilir enerji tüketimi ve ekonomik büyüme arasında çift yönlü nedensellik ilişkisi bulunduğunu tespit etmişlerdir. Aynı zamanda asimetrik nedensellik sonucunda yenilenebilir enerji tüketimi ile CO₂ emisyonları arasında hem kısa hem uzun dönemde çift yönlü nedensellik belirlenmiştir.

Ulusal düzeydeki bu çalışmaların yanı sıra, ABD literatüründe eyalet bazlı panel veri analizleri önemli bir yer tutmaktadır. Salari vd., (2021) ise yenilenebilir ve yenilenemez enerji tüketimini birlikte modelleyerek, fosil yakıt tüketimindeki artışların yenilenebilir enerji kazanımlarını kısmen gölgelediğini ortaya koymuştur. Burnett vd., (2013), mekânsal panel yaklaşımı kullanarak enerji tüketimi ve emisyonlar arasındaki ilişkinin eyalet sınırlarını aşan yayılma etkileri içerdiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, enerji politikalarının yalnızca yerel değil bölgesel ölçekte de koordinasyon gerektirdiğine işaret etmektedir.

Literatürde, yenilenebilir enerji türlerini ayrıştırarak daha ayrıntılı analizler de yapıldığı görülmektedir. Bilgili (2012) ve Kim vd., (2020), ABD'de biyokütle tüketiminin kısa dönemde emisyonları azaltıcı bir etki yaratmadığını, uzun dönemde ise bu etkinin oldukça sınırlı kaldığını göstermektedir. Buna karşılık Grafton vd., (2014), biyoyakıt

sübvansiyonlarının arazi kullanımında değişimlere yol açarak dolaylı karbon salımlarını artırabileceğini ileri sürmektedir. DeCicco vd., (2016) ise yaşam döngüsü analizi yaklaşımıyla, ABD’de üretilen mısır bazlı etanolün net karbon azaltımının oldukça düşük olduğunu, bazı koşullarda fosil yakıtlarla benzer bir karbon ayak izi yaratabildiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, yenilenebilir enerji tüketiminin her durumda düşük emisyonu ya da azaltabileceği anlamına gelmediğini göstermesi bakımından önemlidir.

ABD özelinde önemli bir diğer araştırma konusu ise, yenilenebilir enerji politikalarının CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalardır. Özellikle Renewable Portfolio Standards (RPS) uygulamaları yoğun biçimde analizlere konu edilmektedir. Upton Jr. ve Snyder (2017), sentetik kontrol yöntemi kullanarak RPS uygulayan eyaletlerde CO₂ emisyonlarının istatistiksel olarak anlamlı biçimde düştüğünü göstermiştir. Greenstone vd., (2019) ise bu politikanın maliyet-etkinliğini sorgulayarak, karbon vergisi gibi alternatif politika araçlarına kıyasla bir ton CO₂ azaltımının oldukça yüksek bir maliyete sahip olduğunu ortaya koymuştur. Wiser vd., (2017) tarafından hazırlanan kapsamlı değerlendirme raporları ise RPS programlarının uzun dönemde iklim, halk sağlığı ve istihdam açısından önemli faydalar sağladığını, ancak bu faydaların kısa vadede tüketici maliyetleriyle dengelendiğini göstermektedirler. Jeon (2022) ABD’de yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisinin eyaletler arasında farklılaştığını ve ekonomik büyüme ile emisyonlar arasındaki dinamik ilişkinin de politika bağlamında önemli sonuçlar doğurduğunu vurgulamaktadır.

Holland vd. (2022), ABD elektrik piyasasında yenilenebilir üretimin marjinal CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azalttığını, ancak fosil yakıtlı santrallerin yedekleme ve yük takip davranışlarının bu etkinin büyüklüğünü sınırladığını göstermektedir. Bu bulgular, yenilenebilir enerji yatırımlarının emisyon azaltıcı etkisinin depolama teknolojileri, şebeke esnekliği ve piyasa tasarımıyla yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Payne vd. (2024), ABD eyaletleri arasında kişi başına yenilenebilir enerji üretiminin zaman içinde yakınsama gösterip göstermediğini incelemişlerdir. Çalışmada ABD eyaletleri genelinde kişi başına yenilenebilir enerji üretiminde panel genelinde mutlak yakınsamanın olmadığı tespit edilmiştir.

Literatür genel olarak değerlendirildiğinde, ABD’de yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını azaltıcı bir rol oynadığını güçlü biçimde desteklemektedir. Ancak bu etkinin büyüklüğü, enerji türüne, zamana, bölgesel koşullara ve uygulanan politika araçlarına göre önemli ölçüde değişkenlik gösterebildiği anlaşılmaktadır. Özellikle biyoyakıt, hidroelektrik, atık, odun ve güneş enerjisi kaynaklı enerji tüketimini birlikte ele alan, uzun dönemli verilerle analiz eden çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda çalışmada kullanılan spektral nedensellik analizinin kullanımının oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışma, literatürdeki söz konusu boşluğu doldurarak yenilenebilir enerji türlerinin CO₂ emisyonları

üzerindeki kısa, orta ve uzun dönemli etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla incelemeyi amaçlamaktadır.

Bu çalışma mevcut literatüre çeşitli yönlerden katkı sunmaktadır. İlk olarak, literatürdeki çalışmaların önemli bir bölümü toplam yenilenebilir enerji tüketimini tek bir gösterge olarak ele alırken, bu çalışma biyoyakıt, hidroelektrik, atık, odun ve güneş enerjisi olmak üzere farklı yenilenebilir enerji türlerini ayırıştırarak incelemektedir. Bu yaklaşım, her enerji kaynağının CO₂ emisyonları üzerindeki etkisinin farklılaşabileceği varsayımından hareketle, enerji türlerine özgü dinamiklerin ortaya konulmasına ve daha hedef odaklı politika önerilerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. İkinci olarak, çalışma değişkenler arasındaki ilişkiyi geleneksel zaman serisi yöntemlerinden farklı olarak Breitung ve Candelon (2006) tarafından geliştirilen spektral nedensellik yaklaşımıyla analiz etmektedir. Bu yöntem sayesinde nedensellik ilişkileri yalnızca varlığı açısından değil, aynı zamanda kısa, orta ve uzun dönem frekans bantları boyunca değerlendirilmekte ve enerji-çevre ilişkisinin zaman ufkuna bağlı olarak nasıl değiştiği ortaya koymayı hedeflemektedir. Üçüncü olarak, analiz 1984:M01-2025:M09 dönemini kapsayan uzun dönemli aylık veriler kullanılarak ABD özelinde gerçekleştirilmektedir. ABD’nin hem dünyanın en büyük enerji tüketicileri ve karbon salıncıları arasında yer alması hem de yenilenebilir enerji dönüşümünde öncü ülkelerden biri olması, elde edilen bulguların enerji dönüşümü ve iklim politikaları açısından önemli çıkarımlar sunmasını sağlamaktadır. Bu yönleriyle çalışma, yenilenebilir enerji türleri ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkinin enerji kaynağına ve zaman ufkuna göre farklılaşan yapısını ortaya koyarak mevcut literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

3. Veri Seti ve Metodoloji

3.1. Veri Seti

Bu çalışmada, Amerika Birleşik Devletleri’nde (ABD) yenilenebilir enerji tüketimi ile CO₂ emisyonları arasındaki dinamik ve uzun dönemli ilişkiler 1984:M01-2025:M09 dönemini kapsayan aylık veriler kullanılarak analiz edilmektedir. Çalışmada karbondioksit emisyonları (cdx), biyoyakıt tüketimi (bio), hidroelektrik enerji tüketimi (hydro), atık kaynaklı enerji tüketimi (waste), odun temelli enerji tüketimi (wood) ve güneş enerjisi temelli enerji tüketimi (solar) ile temsil edilmektedir. Veriler ABD Ulusal Enerji Bilgi Yönetim (U.S. Energy Information Administration-EIA)’dan alınmıştır (EIA, 2026).

Çalışmada yenilenebilir enerji türlerinin CO₂ üzerindeki etkisinin ABD özelinde incelenmesinin temel birkaç gerekçesi bulunmaktadır. İlk olarak ABD, Çin ve Hindistan’dan sonra dünyanın en büyük CO₂ emisyonu üreticisi olup küresel enerji kaynaklı emisyonların yaklaşık % 15’ini tek başına ürettiği bilinmektedir (IEA, 2022; BP, 2023). İkinci olarak, son yıllarda yenilenebilir enerji teknolojilerinde önemli yapısal dönüşümler yaşanmış ve

özellikle biyoyakıt politikaları, hidroelektrik kapasite artışı ve atık temelli enerji yatırımlarıyla küresel enerji dönüşümünde öncü bir rol üstlenmiştir. Üçüncü olarak ise, ABD enerji piyasaları hem ölçek hem de çeşitlilik açısından oldukça gelişmiş olup, farklı yenilenebilir enerji türlerinin çevresel etkilerini ayırıştırarak analiz etmeye olanak tanıyan zengin ve yüksek veri altyapısına sahip ülke olarak öne çıkmaktadır (EIA, 2026). Ayrıca ABD özelinde elde edilen bulgular, yalnızca gelişmiş ekonomiler için değil, enerji dönüşüm sürecindeki gelişmekte olan ülkeler açısından da önemli çıkarımlar sunmaktadır. Veriler ağırlıklı olarak U.S. Energy Information Administration (EIA) ve International Energy Agency (IEA) veri tabanlarından temin edilmiştir.

3.2. Birim Kök Testleri

Uzun dönemli enerji ve emisyon serilerinin incelenmesinde, geleneksel ADF ve PP testlerinin yapısal kırılmaları dikkate almaması önemli bir sınırlılık oluşturmaktadır. Bu nedenle çalışmada, serilerin durağanlık özellikleri Zivot–Andrews (1992) ve Perron (1997) yapısal kırılmalı birim kök testleri kullanılarak sınanmıştır. Bu testler, serilerde tek bir içsel veya dışsal yapısal kırılmaya izin vererek birim kök analizinin daha güvenilir yapılmasına imkân tanımaktadır.

Elde edilen sonuçlar, tüm değişkenlerin yapısal kırılmalar dikkate alındığında düzeyde durağan $I(0)$ olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, değişkenlerin seviyelerinde kullanılabileceği ve spektral nedensellik analizinin uygulanmasının istatistiksel olarak uygun olduğu anlamına gelmektedir.

3.3. Spektral Nedensellik Analizi

Çalışmada ABD’de yenilenebilir enerji türlerinin tüketimi ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişki Breitung ve Candelon (2006) tarafından geliştirilen Spektral Nedensellik Analizi ile incelenmektedir. Spektral nedensellik analizi, bir zaman serisindeki değişkenliği periyodik bileşenlerine ayırmakta ve bu değişkenlerdeki dalgalanmalara etki eden nispeten daha önemli frekansları belirlemektedir. Bu çalışmada spektral nedensellik yönteminin tercih edilmesinin temel nedeni, yenilenebilir enerji tüketimi ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkinin zaman ufkuna bağlı olarak farklılaşabilmesidir. Geleneksel Granger nedensellik testi, değişkenler arasındaki nedensellik ilişkisini zaman alanında bütüncül olarak değerlendirmekte ve ilişkinin kısa veya uzun dönem kaynaklarını ayırtıramamaktadır. Buna karşılık, Breitung ve Candelon (2006) tarafından geliştirilen spektral nedensellik yaklaşımı, nedenselliği frekans alanında inceleyerek kısa, orta ve uzun dönem dinamiklerinin ayrı ayrı değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece değişkenler arasındaki ilişkinin yalnızca varlığı değil, aynı zamanda hangi zaman ufuklarında daha güçlü veya daha zayıf olduğu da belirlenebilmektedir. Yenilenebilir enerji yatırımlarının ve çevresel etkilerin genellikle farklı zaman ölçeklerinde ortaya çıktığı dikkate alındığında, spektral nedensellik yaklaşımı enerji-çevre ilişkilerinin dinamik yapısını analiz etmek

açısından geleneksel nedensellik yöntemlerine göre önemli metodolojik avantajlar sunmaktadır (Breitung ve Candelon, 2006; Taştan, 2015; Aydın vd., 2022). Ayrıca, değişkenler arasındaki nedensellik ilişkisi kısa dönem veya uzun dönem şeklinde anlamlandırmaya yardımcı olmaktadır (Taştan, 2015). Değişkenler arasındaki nedenselliğin gücü ve yönü kısa dönem ve uzun dönem için farklı olabilmektedir. Bu yöntem, nedenselliğin yönünün yanı sıra varlığının da frekansa bağlı olup olmadığını araştırmakta ve nedensellik yönünden bağımsız olarak tam gecikme uzunluğunun belirlenmesini sağlamaktadır (Fromentin ve Tadjeddine, 2020). Bu test, eşbütünleşme ilişkilerine ve daha yüksek boyutlu verilerin analizi için kolaylıkla genelleştirilebilir. (Breitung ve Candelon, 2006). Çalışmada yapısal bir emisyon modeli tahmin etmekten ziyade, yenilenebilir enerji türleri ile CO₂ emisyonları arasındaki frekans-bağımlı nedensellik yapısının ortaya konulması hedeflenmektedir. Bu nedenle analiz, Breitung ve Candelon (2006) yaklaşımına uygun olarak ikili değişkenler üzerinden yürütülmüştür. Bu yaklaşım, farklı yenilenebilir enerji türlerinin CO₂ emisyonları ile olan kısa, orta ve uzun dönemli nedensellik ilişkilerinin ayrı ayrı değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Breitung ve Candelon (2006) $d_{\max} > 0$ olduğunu varsayarsak, test regresyonunu şu şekilde ifade edilmektedir (Taştan, 2015):

$$x_t = c_1 + \sum_{j=1}^p \alpha_j x_{t-j} + \sum_{j=1}^p \beta_j y_{t-j} + \sum_{k=p+1}^{p+d_{\max}} \alpha_k x_{t-k} + \sum_{k=p+1}^{p+d_{\max}} \beta_k y_{t-k} + e_t$$

$M_{y \rightarrow x}(\omega) = 0$ formülüyle gösterilen H_0 hipotezi “*Y nedeni değildir X*” şeklinde kurulmaktadır.

4. Analiz ve Bulgular

Çalışmada kurulan modelin analizine geçmeden önce serilerin birim kök kontrolleri yapılmıştır. Serilerin birim kök içerip içermemesi durumuna göre analiz yöntemine karar verilmiştir.

4.1. Birim Kök Testleri

Analizlerde değişkenlerin durağanlık özelliklerinin belirlenmesi, tahmin edilen modellerin tutarlılığı ve güvenilirliği açısından önem taşımaktadır. Geleneksel birim kök testleri olan Augmented Dickey-Fuller (ADF) ve Phillips–Perron (PP) testleri, serilerde yapısal kırılma bulunmadığı varsayımına dayanmaktadır (Dickey ve Fuller, 1979; Phillips ve Perron, 1988). Ancak enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları gibi uzun dönemli seriler, ekonomik krizler, enerji politikalarındaki değişimler, teknolojik dönüşümler ve çevresel düzenlemeler nedeniyle yapısal kırılmalar içerebilmektedir. Yapısal kırılmaların dikkate alınmaması durumunda geleneksel testlerin zayıf güce sahip olabileceği ve durağan serileri yanlış biçimde birim köklü olarak sınıflandırabileceği literatürde vurgulanmaktadır (Perron, 1989). Bu nedenle çalışmada, serilerin durağanlık özelliklerini daha güvenilir biçimde belirlemek amacıyla tek

yapısal kırılmaya izin veren Zivot-Andrews (1992) ve Perron (1997) yapısal kırılmalı birim kök testleri uygulanmıştır. Tablo 2’de birim kök testleri sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 2: Zivot-Andrews ve Perron Birim Kök Testleri Sonuçları

	Zivot-Andrews Kırılmalı Testi	Yapısal Birim Kök	Perron Yapısal Kırılmalı Birim Kök Testi	
	Sabit Olasılık Değ.	Sabit ve Trend Olasılık Değ.	Sabit Kritik Değ.	Sabit ve Trend Kritik Değ.
CDX	[0.00670]	[0.00029]	(-7.792957)	(-12.99739)
Hydro	[0.016576]	[0.00129]	(-11.29955)	(-11.66630)
Bio	[0.000108]	[0.000412]	(-6.419427)	(-7.441734)
Waste	[0.004881]	[0.007648]	(-6.606763)	(-8.812883)
Wood	[0.00520]	[0.00332]	(-8.536919)	(-8.516532)
Solar	[0.025145]	[2.50E-09]	(-8.383950)	(-13.89656)

Perron Düzeyde Kritik Değerleri: 1%:-5.92, 5%: -5.23 10%: -4.92. **Perron Trendde Kritik Değerleri:** 1%: -6.32, 5%: -5.59, 10%: -5.29. [.] Olasılık değerlerini ve (.) kritik değerlerini göstermektedir.

Zivot-Andrews testi, serilerde tek yapısal kırılmaya izin vererek birim kök durumunu incelemektedir. Tablo 2’de hem “sabit” hem de “sabit ve trend” için hesaplanan olasılık değerleri tüm değişkenler (cdx, hydro, bio, waste, wood ve solar) açısından % 5 anlamlılık düzeyinin oldukça altındadır. Bu bulgular, H_0 hipotezinin (*serilerin birim kök içerdiği*) reddedildiğini göstermektedir. Dolayısıyla, CO₂ emisyonları, Hidroelektrik enerji, Biyoyakıt enerjisi, Atık kaynaklı enerji ve Odun ve güneş enerjisi serileri, yapısal kırılma dikkate alındığında düzeyde durağan ($I(0)$) olarak değerlendirilmektedir.

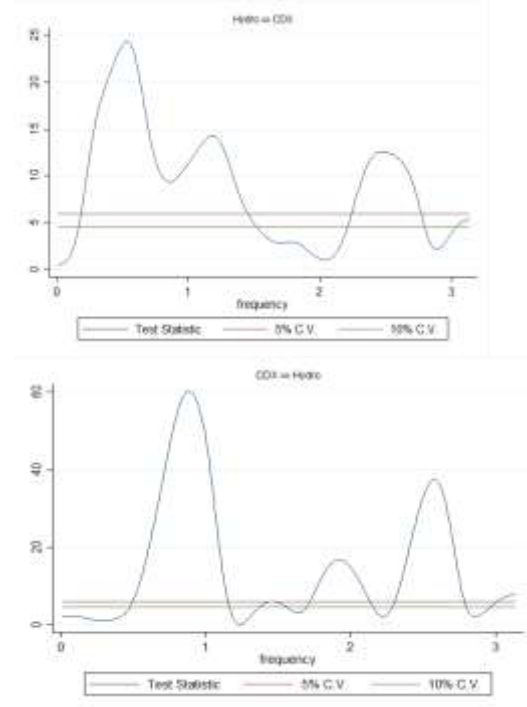
Perron testi, yapısal kırılmanın dışsal olarak belirlendiği bir çerçevede birim kök hipotezini sınamaktadır. Tablo 2’deki test istatistiklerinin, hem sabitli hem de sabit ve trendli modeller altında tüm değişkenler için ilgili kritik değerlerinden (% 1, % 5 ve % 10) mutlak değer olarak büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, Perron testi kapsamında da sıfır hipotezinin reddedildiğini ve serilerin yapısal kırılma altında durağan olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, serilerin düzey değerlerinde durağan olduğunu ve spektral nedensellik analizinin uygulanması için gerekli ön koşulların sağlandığını göstermektedir.

4.2. Spektral Nedensellik Analizi Sonuçları

Çalışmada değişkenlerin düzey halleri kullanılarak Spektral nedensellik analizi uygulanmıştır. Analiz için uygun gecikme uzunluğu Taştan (2015) çalışmasında vurguladığı üzere AIC (Akaike information criterion), HQIC (Hannan-Quinn information criterion) ve SBIC (Schwarz-Bayesian information criterion) göre belirlenmektedir. Esas itibarıyla bu çalışmada uygun gecikme uzunluğu AIC’e göre belirlenmiştir. İlk olarak Hidroelektrik enerji tüketimi ile

CO₂ emisyonları arasındaki Spektral nedensellik analizinin sonuçları Grafik 1’de gösterilmektedir.

Grafik 1: Hidroelektrik Enerji Tüketimi ve CO₂ Emisyonları Nedensellik Sonuçları

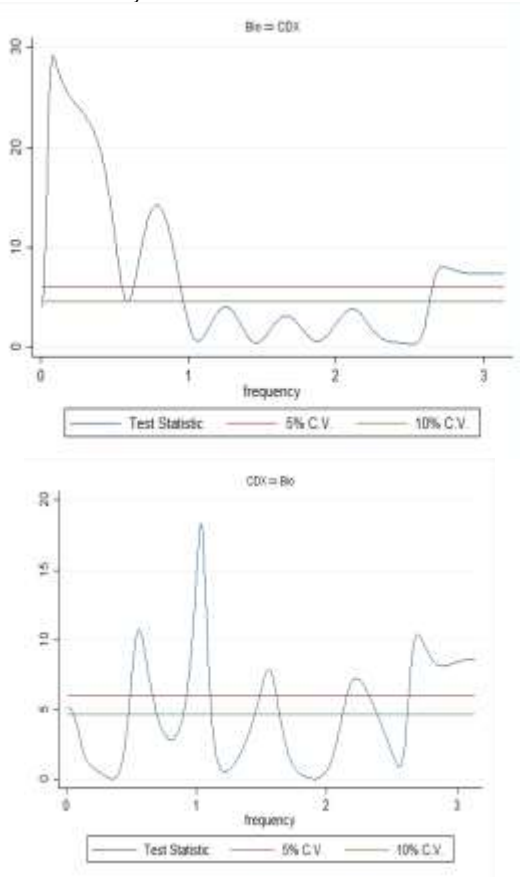


Gecikme uzunlukları AIC’e göre 14 olarak belirlenmiştir.

Spektral nedensellik analizi değişkenler arasındaki nedensellik ilişkisini kısa ve uzun dönem olarak inceleme fırsatı sunmaktadır (Taştan, 2010). Analizde uzun dönem için 0.5 ve kısa dönem için 2.5 frekans uzunlukları belirtilmektedir. Başka bir deyişle, 0,5 kalıcı bir nedenselliği, 2.5 ise geçici bir nedenselliği ifade etmektedir. Uzun dönem 1 yıldan uzun ve kısa dönem ise yaklaşık 3 aylık dönemleri ifade etmektedir (Aydın vd., 2022). İlk olarak, hidroelektrik tüketiminden CO₂ emisyonlarına doğru nedensellik (Hydro→CDX) incelendiğinde, test istatistiğinin belirli frekans aralıklarında kritik değerlerin üzerine çıktığı görülmektedir. Özellikle orta frekans bandında Hydro’dan CDX’e doğru $\omega \in [0.17-1.51]$ aralığında % 10 anlamlılık düzeyinde nedenselliğin olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, hidroelektrik enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını orta ve uzun vadede anlamlı biçimde etkilediğini göstermektedir. Ayrıca daha yüksek frekanslarda $\omega \in [2.22-2.79]$ ve $[3.05-3.14]$ yeniden ortaya çıkan anlamlılık, bu ilişkinin kısa dönem dalgalanmalarında da etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, hidroelektrik enerji kullanımındaki değişimlerin hem uzun dönemli hem de kısa dönemli etkiler oluşturabileceğine işaret etmektedir. Diğer taraftan, CO₂ emisyonlarından hidroelektrik tüketimine doğru nedensellik (CDX→Hydro) daha güçlü ve $\omega \in [0.48-1.16]$, $[1.38-1.55]$, $[1.70-2.15]$, $[2.29-2.79]$ ve $[2.97-3.14]$ gibi daha geniş bir frekans bandında gözlemlenmektedir. Özellikle düşük ve orta

frekanslarda yoğun nedensellik ilişkisinin olması, CO₂ emisyonlarının hidroelektrik enerji tüketimi üzerinde daha baskın ve belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Bu bulgu, çevresel baskılar, karbon azaltım politikaları ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda enerji tercihlerinin şekillendiğine işaret etmektedir. Bu sonuç, hidroelektrik enerjinin elektrik üretiminde fosil yakıtların ikame edilmesine katkı sağlaması ve düşük karbonlu enerji dönüşümünde önemli bir rol üstlenmesiyle ilişkilendirilebilir. ABD’de hidroelektrik enerjinin enerji arzı içerisindeki köklü konumu, karbon yoğunluğunun azaltılmasına katkı sağlayarak CO₂ emisyonları ile hidroelektrik enerji tüketimi arasındaki uzun dönemli etkileşimi güçlendirebilmektedir (Sadorsky, 2009; Pata, 2018). Ayrıca çevresel düzenlemelerin sıkılaşması ve karbon azaltım politikalarının yaygınlaşması, hidroelektrik yatırımlarına yönelik teşvikleri artırarak çevresel baskılar ile yenilenebilir enerji tercihleri arasındaki ilişkiyi güçlendirebilmektedir (IEA, 2022; Payne vd., 2024). Biyoyakıt enerjisi tüketimi ve CO₂ emisyonları nedensellik sonuçları Grafik 2’de gösterilmektedir.

Grafik 2: Biyoyakıt Enerjisi Tüketimi ve CO₂ Emisyonları Nedensellik Sonuçları

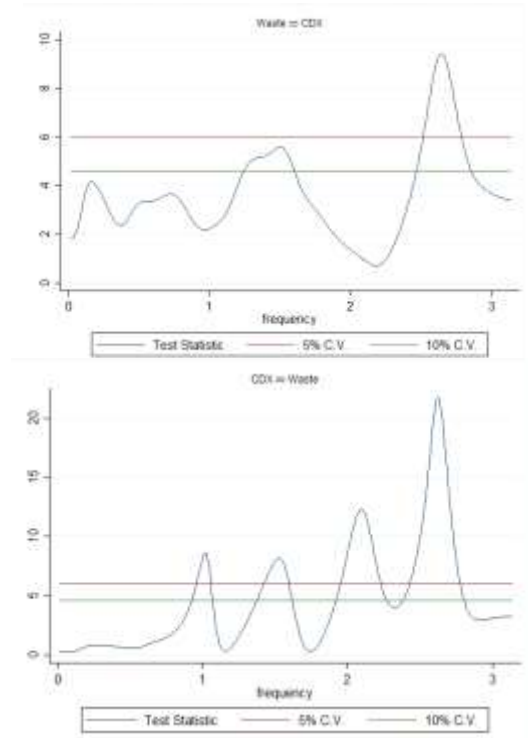


Gecikme uzunlukları AIC’e göre 13 olarak belirlenmiştir.

Bio→CDX yönündeki bulgular incelendiğinde, düşük frekanslarda $\omega \in [0.02-0.96]$ test istatistiğinin % 10 kritik değerinin oldukça üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durum, biyoyakıt enerjisi tüketiminin CO₂ emisyonları

üzerinde uzun dönemli güçlü bir nedensellik etkisine sahip olduğunu göstermektedir. Ancak frekans arttıkça test istatistiğinin hızla düştüğü ve orta frekans bandında çoğunlukla kritik değerlerin altında kaldığı gözlemlenmektedir. Bu sonuç, biyoyakıt enerjisi tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisinin kısa ve orta vadede zayıf ve istatistiksel olarak anlamsız olduğunu ortaya koymaktadır. Yüksek frekanslarda $\omega \in [2.64-3.14]$ yeniden bir anlamlılık görülmektedir. Bu sonuçlar, biyoyakıt enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerinde uzun dönemde daha çok yapısal ve kalıcı etkilerinin olduğu ve kısa dönemde ilişkinin geçici şoklar tarafından şekillendiği anlaşılmaktadır. Buna karşılık, CDX→Bio yönündeki nedensellik sonuçları daha dalgalı bir yapı sergilemektedir. Özellikle $\omega \in [0.01-0.05]$, $[0.48-0.69]$, $[0.90-1.11]$, $[1.45-1.63]$, $[2.13-2.38]$ ve $[2.62-3.14]$ frekans bantlarında test istatistiğinin kritik değerleri aşması, CO₂ emisyonlarının biyoyakıt enerji tüketimini hem uzun, hem orta hem de kısa vadede etkileyebildiğini göstermektedir. Bu durum, biyoyakıt yatırımlarının enerji sistemine entegrasyonunun zaman alması ve çevresel etkilerinin çoğunlukla uzun dönemde ortaya çıkmasıyla açıklanabilir. Özellikle ABD’de etanol ve biyoyakıt üretimine yönelik teşvik programları, emisyon azaltıcı etkilerin zaman içerisinde kademeli olarak gerçekleşmesine neden olmaktadır (Kim vd., 2020). Bununla birlikte, biyoyakıtların karbon azaltım performansının kullanılan teknolojiye ve üretim sürecine bağlı olarak değişebildiği de literatürde vurgulanmaktadır (Grafton vd., 2014; DeCicco vd., 2016). Grafik 3 Atık temelli enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları arasındaki nedensellik sonuçlarını göstermektedir.

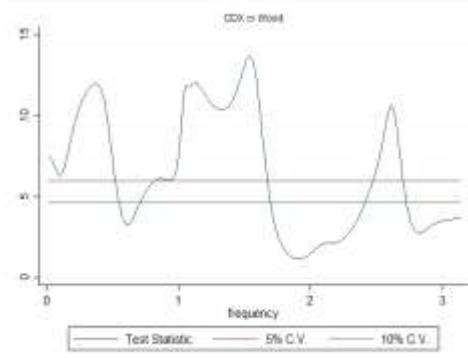
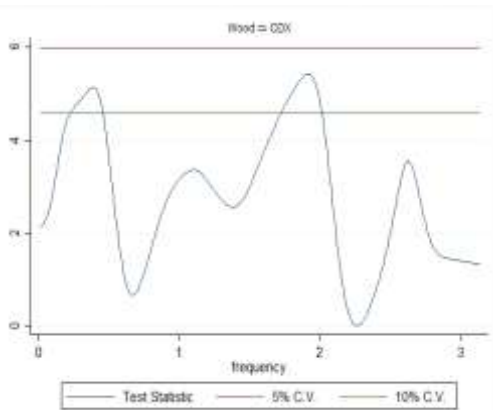
Grafik 3: Atık Temelli Enerji Tüketimi ve CO₂ Emisyonları Nedensellik Sonuçları



Gecikme uzunlukları AIC'e göre 15 olarak belirlenmiştir.

Waste→CDX yönündeki bulgular incelendiğinde, nedensellik ilişkisinin frekans boyunca homojen olmadığı ve belirli bantlarda yoğunlaştığı görülmektedir. Düşük ve orta frekanslarda test istatistiğinin çoğunlukla kritik değerlerin altında kalması, atık kaynaklı enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisinin uzun ve orta vadede sınırlı veya istatistiksel olarak anlamsız olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, özellikle yüksek frekans bandında $\omega \in [1.25-1.60]$ ve $[2.47-2.85]$ frekans bantlarında test istatistiklerinin % 10 kritik değerini aşması, atık temelli enerji tüketiminden CO₂ emisyonlarına doğru kısa dönemli bir nedensellik ilişkisinin varlığına işaret etmektedir. Bu durum, atık yönetimi, geri dönüşüm faaliyetleri veya atık kaynaklı enerji tüketimindeki ani değişimlerin CO₂ emisyonlarını kısa vadede etkileyebileceğini göstermektedir. Diğer taraftan, CDX→Waste yönündeki nedensellik sonuçları daha güçlü ve daha geniş frekans bantlarında ortaya çıkmaktadır. Özellikle $\omega \in [0.93-1.06]$, $[1.38-1.61]$, $[1.92-2.26]$ ve $[2.39-2.80]$ gibi orta ve yüksek frekans aralıklarında test istatistiğinin kritik değerleri aşması, CO₂ emisyonlarının atık dinamikleri üzerinde kısa ve orta vadede belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek frekanslarda gözlenen güçlü nedensellik, kısa vadeli çevresel şokların ve politika tepkilerinin atık yönetimi üzerinde hızlı etkiler yaratabildiğini göstermektedir. Atık temelli enerji üretiminin çoğunlukla yerel atık yönetimi uygulamaları ve geri dönüşüm faaliyetleriyle bağlantılı olması, etkilerin daha çok kısa dönemli frekanslarda ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Çevresel düzenlemeler ve atık yönetim politikalarında meydana gelen değişimler, enerji üretimi ve emisyonlar üzerinde hızlı ancak sınırlı etkiler yaratabilmektedir (IEA, 2022). Bu nedenle atık temelli enerji tüketimi ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkinin daha çok kısa vadeli politika uygulamaları ve sistem dinamikleri tarafından şekillendiği söylenebilir (Holland vd., 2022). Grafik 4 odun temelli enerji tüketiminin CO₂ emisyonları arasındaki nedensellik sonuçlarını göstermektedir.

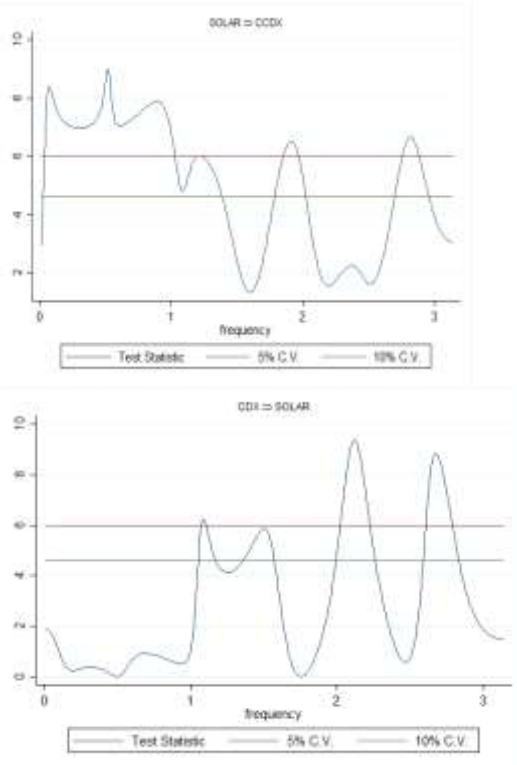
Grafik 4: Odun Temelli Enerji Tüketimi ve CO₂ Emisyonları Nedensellik Sonuçları



Gecikme uzunlukları AIC'e göre 15 olarak belirlenmiştir.

Wood→CDX yönündeki nedensellik bulguları incelendiğinde, nedensellik ilişkisinin frekans boyunca homojen olmadığı ve belirli bantlarda ortaya çıktığı görülmektedir. Düşük frekanslarda $\omega \in [0.23-0.45]$ ve $[1.73-2.01]$ test istatistiğinin kritik değerleri aştığı ve odun temelli enerji tüketiminden CO₂ emisyonlarına doğru orta ve uzun dönemli istatistiksel olarak anlamlı bir nedensellik ilişkisinin bulunduğu anlaşılmaktadır. Buna karşılık, bazı yüksek frekans aralıklarında, ilişkinin kısa vadede istikrarlı bir nedensellik yapısı sergilemediği görülmektedir. Bu bulgular, odun temelli enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisinin düzensiz, uzun dönemli ve frekansa duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer taraftan, CDX→Wood yönündeki nedensellik sonuçları daha belirgin ve güçlü bir yapı sergilemektedir. Özellikle düşük ve orta frekans bantlarında $\omega \in [0.01-0.54]$, $[0.71-1.69]$ ve $[2.42-2.72]$ test istatistiğinin % 10 kritik değerini aşması, CO₂ emisyonlarının odun temelli enerji tüketimi üzerinde uzun ve orta vadede anlamlı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Yüksek frekanslarda $\omega \in [2.42-2.72]$ bandında gözlenen anlamlılık, ilişkinin kısa vadeli dalgalanmalara da duyarlı olduğunu ve özellikle çevresel şoklar, enerji talep değişimleri veya politika müdahaleleri gibi faktörler aracılığıyla odun temelli enerji tüketiminde kısa vadeli değişimlere yol açabileceğini göstermektedir. Bu sonuç, odun temelli enerjinin çevresel etkilerinin kullanılan yakma teknolojilerine, enerji verimliliğine ve biyokütlein sürdürülebilir şekilde temin edilip edilmemesine bağlı olarak değişebilmesiyle açıklanabilir. Literatürde biyokütle kaynaklarının karbon etkilerinin homojen olmadığı ve teknoloji düzeyine bağlı olarak farklı sonuçlar üretebildiği vurgulanmaktadır (Bilgili vd., 2016; Kim vd., 2020). Ayrıca biyokütle talebindeki mevsimsel dalgalanmalar, sürdürülebilir orman yönetimi uygulamaları ve arazi kullanımındaki değişimler, odun temelli enerji tüketimi ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkinin zaman içerisinde farklılaşmasına neden olabilmektedir (Grafton vd., 2014; DeCicco vd., 2016). Bu nedenle odun temelli enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi diğer yenilenebilir enerji türlerine kıyasla daha düzensiz ve frekansa duyarlı bir yapı sergileyebilmektedir. Grafik 5 güneş enerjisi tüketimi ve CO₂ Emisyonları arasındaki nedensellik sonuçlarını göstermektedir.

Grafik 5: Güneş Enerjisi Tüketimi ve CO₂ Emisyonları Nedensellik Sonuçları



Gecikme uzunlukları AIC'e göre 15 olarak belirlenmiştir.

Solar→CDX yönündeki bulgular incelendiğinde, nedensellik ilişkisinin belirli frekans bantlarında yoğunlaştığı görülmektedir. Düşük frekans bandında $\omega \in [0.03-1.38]$ ve $[1.79-2.02]$ test istatistiğinin % 10 kritik değerlerinin üstünde kalması güneş enerjisi tüketiminin CO₂ emisyonları üzerinde uzun dönemli belirgin bir nedensellik etkisi oluşturduğu anlaşılmaktadır. Yüksek frekanslarda $\omega \in [2.70-2.95]$ test istatistiğinin kritik değerlerinin üstünde olması, güneş enerjisinin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisinin kısa vadeli dalgalanmalara duyarlı olduğunu göstermektedir. CDX→Solar yönündeki nedensellik sonuçları daha güçlü ve dikkat çekici bir yapı sergilemektedir. Özellikle orta ve yüksek frekans bantlarında $\omega \in [1.05-1.16]$, $[1.36-1.57]$, $[2.00-2.26]$ ve $[2.60-2.83]$ test istatistiğinin %10 kritik değerlerini aşması, CO₂ emisyonlarının güneş enerjisi tüketimi üzerinde kısa ve orta vadede anlamlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, artan karbon emisyonlarının ve çevresel baskıların yenilenebilir enerjiye yönelimi etkilediğini göstermektedir. Bu bulgu, son yıllarda güneş enerjisi teknolojilerinde yaşanan maliyet düşüşleri, verimlilik artışları ve federal düzeyde uygulanan yenilenebilir enerji teşvikleri ile ilişkilendirilebilir. ABD'de özellikle son on yılda güneş enerjisi yatırımlarındaki hızlı artış, enerji üretiminde düşük karbonlu kaynakların payını yükseltmiş ve enerji dönüşüm sürecini hızlandırmıştır (IEA, 2022; Energy Institute, 2026). Ayrıca çevresel baskılar ve karbon azaltım hedeflerinin güçlenmesi, güneş enerjisine

yönelik yatırımları teşvik ederek CO₂ emisyonları ile güneş enerjisi tüketimi arasındaki ilişkinin daha belirgin hale gelmesine katkı sağlamaktadır (Sovacool, 2016; Payne vd., 2024).

5. Sonuç ve Politika Önerileri

Bu çalışmada, ABD'de yenilenebilir enerji türleri (biyoyakıt, hidroelektrik, atık, odun ve güneş enerjisi) ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişki 1984:M01–2025:M09 dönemi için spektral nedensellik yaklaşımı çerçevesinde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, değişkenler arasındaki ilişkinin frekans boyunca homojen olmadığını ve zaman ufkuna bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymaktadır. Bu yönüyle bulgular, yenilenebilir enerji-çevre ilişkisinin doğrusal ve sabit olmadığını ortaya koyan literatürle uyumludur (Bilgili, 2012; Bilgili vd., 2016; Jeon, 2022). Analiz sonuçları, CO₂ emisyonlarından yenilenebilir enerji tüketimine doğru nedenselliğin tüm enerji türlerinde daha güçlü ve daha geniş frekans bantlarında ortaya çıktığını göstermektedir. Bu durum, çevresel baskılar ve karbon azaltım politikalarının enerji tercihlerini şekillendirmede belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu bulgu, CO₂ emisyonlarının yenilenebilir enerji talebinin önemli belirleyicilerinden biri olduğunu ortaya koyan Sadorsky (2009) ile ve ABD'de enerji dönüşümünün heterojen bir yapıya sahip olduğunu vurgulayan çalışmalarla paralellik göstermektedir (Salari vd., 2021; Payne vd., 2024). Buna karşılık, yenilenebilir enerji türlerinin tüketiminden CO₂ emisyonlarına doğru nedensellik daha sınırlı, parçalı ve enerji türüne bağlı olarak farklılaşmaktadır. Biyoyakıt için elde edilen bulgular, etkinin daha çok düşük frekanslarda yoğunlaştığını ve uzun dönemli bir yapı sergilediğini göstermektedir. Bu sonuç, biyoyakıt tüketiminin kısa vadede sınırlı, uzun vadede ise görece daha belirgin etkiler oluşturduğunu ortaya koyan çalışmalarla uyumludur (Kim vd., 2020; Bilgili, 2012). Bununla birlikte, biyoyakıtların net karbon etkisinin her zaman güçlü olmayabileceğini ileri süren çalışmalar da bu bulguların dikkatli yorumlanması gerektiğini göstermektedir (Grafton vd., 2014; DeCicco vd., 2016).

Hidroelektrik ve atık temelli enerji için elde edilen sonuçlar, bu kaynakların özellikle kısa dönemli frekans bantlarında daha belirgin etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Bu durum, söz konusu enerji türlerinin emisyonlar üzerindeki etkisinin daha çok kısa vadeli dalgalanmalar ve sistem dinamikleri ile ilişkili olduğunu düşündürmektedir. ABD enerji sisteminde yenilenebilir üretimin marjinal emisyon etkisinin üretim bileşimi ve sistem esnekliği ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koyan Holland vd. (2022) bu bulguları desteklemektedir.

Odun temelli enerji tüketimi ise düzensiz ve frekansa duyarlı bir yapı sergilemektedir. Bu bulgu, biyokütle temelli enerji kaynaklarının çevresel etkilerinin teknolojiye ve kullanım biçimine bağlı olarak değişebildiğini ortaya koyan literatürle uyumludur (Bilgili vd., 2016; Kim vd., 2020).

Güneş enerjisi için elde edilen bulgular, hem düşük frekanslarda hem de belirli yüksek frekans bantlarında anlamlı nedensellik ilişkileri olduğunu göstermektedir. Bu durum, güneş enerjisinin hem uzun dönemli enerji dönüşümünün bir parçası olduğunu hem de kısa vadeli politika ve talep şoklarına duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerji politikalarının emisyonlar üzerindeki etkisinin heterojen olduğunu vurgulayan çalışmalar da bu bulgularla örtüşmektedir (Upton ve Snyder, 2017; Greenstone vd., 2019; Wiser vd., 2017).

Bu çerçevede, çalışmanın en önemli politika sonuçlarından birisi, enerji ve iklim politikalarının frekans bağımlı ve enerji türüne özgü olarak tasarlanması gerekliliğidir. Kısa vadede etkili politika araçları ile uzun vadeli yapısal dönüşüm politikalarının ayrıştırılması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji türlerinin homojen bir yapı sergilemediği göz önüne alındığında, enerji politikalarının kaynak türüne göre farklılaştırılması gerekmektedir. Bu sonuç, yenilenebilir enerji-CO₂ ilişkisinin asimetrik ve heterojen olduğunu ortaya koyan önceki çalışmalarla da uyumludur (Jeon, 2022; Pata, 2018).

Politika araçlarının enerji türlerine ve zaman ufuklarına göre farklılaştırılması önem taşımaktadır. Kısa dönemde, güneş enerjisi ve biyoyakıt yatırımlarının hızlandırılması amacıyla vergi indirimleri, yatırım teşvikleri ve üretim destekleri gibi finansal araçların kullanılması etkili olabilir. Atık temelli enerji sistemlerinde ise belediye düzeyinde geri dönüşüm ve enerji geri kazanım projelerinin teşvik edilmesi kısa vadede çevresel kazanımlar sağlayabilir. Uzun dönemde ise hidroelektrik altyapısının modernizasyonu, şebeke esnekliğinin artırılması ve enerji depolama teknolojilerine yönelik yatırımların desteklenmesi gerekmektedir. Odun temelli enerji açısından ise sürdürülebilir orman yönetimi uygulamalarının yaygınlaştırılması, yüksek verimli biyokütle teknolojilerinin teşvik edilmesi ve arazi kullanım planlamalarının güçlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle enerji dönüşüm politikalarının tek tip uygulamalar yerine enerji kaynağına özgü teşvik ve düzenleme mekanizmaları çerçevesinde tasarlanması daha etkin sonuçlar üretebilir (IEA, 2022; Holland vd., 2022; Sovacool, 2016).

ABD özelinde elde edilen bulgular, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'nın (SKH) özellikle SKH7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji) ve SKH13 (İklim Eylemi) hedefleri açısından önemli çıkarımlar sunmaktadır (UNDP, 2015). Ayrıca bu sonuçlar, gelişmekte olan ülkeler için de önemli politika uzanımları sunmaktadır. Yenilenebilir enerji yatırımlarının kısa vadede sınırlı etkiler üretmesine rağmen, uzun vadede CO₂ emisyonları ve çevresel sürdürülebilirlik açısından daha belirgin katkılar sunabileceği anlaşılmaktadır (Stern, 2007; Destek ve Sinha, 2020). Bu bağlamda, enerji dönüşüm süreçlerinde yalnızca ekonomik büyüme odaklı değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği merkeze alan kısa ve uzun dönemli etkileri dikkate alan politika çerçevelerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, çalışmanın bazı

sınırlılıkları bulunmaktadır. Analiz, Breitung ve Candelon (2006) tarafından geliştirilen simetrik spektral nedensellik yaklaşımına dayanmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji tüketimindeki pozitif ve negatif şokların CO₂ emisyonları üzerindeki farklı etkileri ayrı ayrı incelenememiştir. Özellikle ABD üzerine gerçekleştirilen son çalışmalar, enerji tüketimindeki artış ve azalışların çevresel sonuçlarının asimetrik olabileceğini göstermektedir (Zuhal ve Göcen, 2025). Bu nedenle gelecekte yapılacak araştırmalarda, asimetrik frekans alanı nedensellik yaklaşımlarının kullanılması, yenilenebilir enerji-çevre ilişkisinin daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayabilir.

Kaynakça

- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., & Hémous, D. (2012). The environment and directed technical change. *American Economic Review*, 102(1), 131–166. <https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131>
- Apergis, N., & Payne, J. (2014). Renewable energy, output, CO₂ emissions, and fossil fuel prices in Central America: Evidence from a nonlinear panel smooth transition vector error correction model. *Energy Economics*, 42, 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.01.003>
- Aydın, M., Pata, U. K., & Inal, V. (2022). Economic policy uncertainty and stock prices in BRIC countries: Evidence from asymmetric frequency domain causality approach. *Applied Economic Analysis*, 30(89), 114–129. <https://doi.org/10.1108/AEA-12-2020-0172>
- Bilgili, F. (2012). The impact of biomass consumption on CO₂ emissions: Cointegration analyses with regime shifts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5349–5354. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.021>
- Bilgili, F., Koçak, E., & Bulut, Ü. (2016). The dynamic impact of renewable energy consumption on CO₂ emissions: A revisited environmental Kuznets curve approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 838–845. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.080>
- BP. (2023). *Statistical review of world energy 2023*. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Breitung, J., & Candelon, B. (2006). Testing for short- and long-run causality: A frequency-domain approach. *Journal of Econometrics*, 132(2), 363–378. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2005.02.004>
- Burnett, J., Bergstrom, J., & Wetzstein, M. (2013). Carbon dioxide emissions and economic growth in the U.S. *Journal of Policy Modeling*, 35(6), 1014–1028. <https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2013.08.001>
- DeCicco, J., Liu, D., Heo, J., Krishnan, R., Kurthen, A., & Wang, L. (2016). Carbon balance effects of U.S. biofuel

- production and use. *Climatic Change*, 138, 667–680. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1764-4>
- Destek, M., & Aslan, A. (2017). Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth in emerging economies: Evidence from bootstrap panel causality. *Renewable Energy*, 111, 757–763. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.008>
- Destek, M., & Sinha, A. (2020). *Renewable, non-renewable energy consumption, economic growth, trade openness and ecological footprint: Evidence from organisation for economic co-operation and development countries* (MPRA Paper No. 104246). Munich Personal RePEc Archive. <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/104246/>
- Dickey, D., & Fuller, W. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*, 74(366), 427–431. <https://doi.org/10.2307/2286348>
- Dogan, E., & Ozturk, I. (2017). The influence of renewable and non-renewable energy consumption and real income on CO2 emissions in the USA: Evidence from structural break tests. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 10846–10854. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8786-y>
- EIA. (2026). *Renewable energy* [Data set]. <https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/>
- Energy Institute. (2026). *2024 key highlights: Insights by source*. <https://www.energyinst.org/statistical-review/insights-by-source>
- Fromentin, V., & Tadjeddine, Y. (2020). Cross-border workers and financial instability: A frequency domain causality analysis applied to the Luxembourg financial centre. *Applied Economics Letters*, 27(4), 280–285. <https://doi.org/10.1080/13504851.2019.1613496>
- Grafton, R., Kompas, T., Long, N., & To, H. (2014). US biofuels subsidies and CO2 emissions: An empirical test for a weak and a strong green paradox. *Energy Policy*, 68, 550–555. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.006>
- Greenstone, M., McDowell, R., & Nath, I. (2019). *Do renewable portfolio standards deliver?* (Working Paper No. 2019-62). Energy Policy Institute at the University of Chicago. https://bfi.uchicago.edu/wp-content/uploads/BFIEPIC_WP_201962_v3.pdf
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). *Environmental impacts of a North American free trade agreement* (NBER Working Paper No. 3914). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w3914>
- Holland, S., Kotchen, M., Mansur, E., & Yates, A. (2022). Why marginal CO2 emissions are not decreasing for US electricity: Estimates and implications for climate policy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(8), Article e2116632119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2116632119>
- IEA. (2022). *World energy outlook 2022*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>
- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- IRENA, & CPI. (2025). *Global landscape of energy transition finance 2025*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications>
- Jeon, H. (2022). CO2 emissions, renewable energy and economic growth in the US. *The Electricity Journal*, 35(7), Article 107170. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2022.107170>
- Kim, G., Choi, S.-K., & Seok, J. (2020). Does biomass energy consumption reduce total energy CO2 emissions in the US? *Journal of Policy Modeling*, 42, 953–967. <https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2020.02.009>
- Mai, T., Jadun, P., Logan, J., McMillan, C., Muratori, M., Steinberg, D., ... Nelson, B. (2018). *Electrification futures study: Scenarios of electric technology adoption and power consumption for the United States* (Report No. NREL/TP-6A20-71500). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/71500.pdf>
- Nordhaus, W. (2017). Revisiting the social cost of carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(7), 1518–1523. <https://doi.org/10.1073/pnas.1609244114>
- Pata, U. (2018). Renewable energy consumption, urbanization, financial development, income and CO2 emissions in Turkey: Testing EKC hypothesis with structural breaks. *Journal of Cleaner Production*, 187, 770–779. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.236>
- Payne, J., Saunoris, J., Nazlioglu, S., & Smyth, R. (2024). Renewable energy production across U.S. states: Convergence or divergence? *Energy Economics*, 140, Article 108015. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.108015>
- Perron, P. (1989). The great crash, the oil price shock, and the unit root hypothesis. *Econometrica*, 57(6), 1361–1401. <https://doi.org/10.2307/1913712>
- Perron, P. (1997). Further evidence on breaking trend functions in macroeconomic variables. *Journal of Econometrics*, 80(2), 355–385. [https://doi.org/10.1016/S0304-4076\(97\)00049-3](https://doi.org/10.1016/S0304-4076(97)00049-3)
- Phillips, P., & Perron, P. (1988). Testing for a unit root in time series regression. *Biometrika*, 75(2), 335–346. <https://doi.org/10.2307/2336182>

- Popp, D. (2002). Induced innovation and energy prices. *American Economic Review*, 92(1), 160–180. <https://doi.org/10.1257/000282802760015658>
- Sadorsky, P. (2009). Renewable energy consumption and income in emerging economies. *Energy Policy*, 37(10), 4021–4028. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.05.003>
- Salari, M., Javid, R., & Noghanibehambari, H. (2021). The nexus between CO2 emissions, energy consumption, and economic growth in the U.S. *Economic Analysis and Policy*, 69, 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2020.12.007>
- Sovacool, B. K. (2016). How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 13, 202–215. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.020>
- Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the environmental Kuznets curve. *World Development*, 32(8), 1419–1439. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2004.03.004>
- Stern, N. (2007). *The economics of climate change: The Stern review*. Cambridge University Press. https://assets.cambridge.org/97805217/00801/frontmatter/9780521700801_frontmatter.pdf
- Taştan, H. (2010). Türkiye'de ihracat, ithalat ve ekonomik büyüme arasındaki nedensellik ilişkilerinin spektral analizi. *Ekonomi Bilimleri Dergisi*, 2(1), 87–98. <https://izlik.org/JA52TP66BG>
- Taştan, H. (2015). Testing for spectral Granger causality. *The Stata Journal*, 15(4), 1157–1166. <https://doi.org/10.1177/1536867X1501500411>
- UNDP. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development* (A/RES/70/1). United Nations Development Programme. <https://files.acquia.undp.org/public/migration/ua/Agenda2030-eng.pdf>
- Upton, G., Jr., & Snyder, B. (2017). Funding renewable energy: An analysis of renewable portfolio standards. *Energy Economics*, 66, 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.06.003>
- Wiser, R., Mai, T., Millstein, D., Barbose, G., Bird, L., Heeter, J., ... Macknick, J. (2017). Assessing the costs and benefits of US renewable portfolio standards. *Environmental Research Letters*, 12(9), Article 094023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa87bd>
- Zivot, E., & Andrews, D. (1992). Further evidence on the great crash, the oil-price shock, and the unit-root hypothesis. *Journal of Business & Economic Statistics*, 10(3), 251–270. <https://doi.org/10.2307/1391541>
- Zuhal, M., & Göcen, S. (2025). The relationship between CO2 emissions, renewable energy and economic growth in the US: Evidence from symmetric and asymmetric spectral Granger causality analysis. *Environment, Development and Sustainability*, 27, 28019–28040.

Extended Summary

Purpose

Climate change and global warming have made it imperative to reduce reliance on fossil fuels and increase the share of renewable energy sources in energy production. Understanding the direction, magnitude, and dynamics of the relationship between renewable energy consumption and carbon dioxide (CO₂) emissions is therefore crucial for effective environmental and energy policy design. Since the industrial revolution, intensive fossil fuel use has significantly increased CO₂ emissions, creating serious environmental, economic, and social challenges (IPCC, 2023; IEA, 2022; Nordhaus, 2017). Although renewable energy is widely recognized as a key tool in mitigating climate change, its effects on emissions are not uniform across energy types and countries (Sadorsky, 2009; Pata, 2018). This study empirically examines the dynamic relationship between renewable energy consumption, biofuels, hydroelectric, waste, wood, and solar, and CO₂ emissions in the United States using high-frequency monthly data from January 1984 to September 2025. It contributes to the literature by disaggregating renewable energy types, employing long-term monthly data, and applying a spectral causality framework capturing short-, medium-, and long-term dynamics.

Literature Review

The literature generally suggests that renewable energy consumption reduces CO₂ emissions, particularly in the long run, although the magnitude, direction, and stability of this relationship vary depending on methodology, energy type, and country characteristics. Apergis and Payne (2014) find long-run reductions, while Bilgili et al. (2016) report potential nonlinearity. Destek and Sinha (2020) and Pata (2018) emphasize heterogeneity across energy types. Empirical findings for the United States remain mixed. Studies such as Dogan and Ozturk (2017) indicate emission reductions, whereas others highlight asymmetries and weak short-term effects (Bilgili, 2012; Kim et al., 2020). Energy-specific analyses reveal heterogeneous outcomes; for example, biofuels may produce limited or adverse environmental effects under certain conditions (Grafton et al., 2014; DeCicco et al., 2016). Policy-oriented studies on Renewable Portfolio Standards (RPS) show that effectiveness depends on context and may involve trade-offs between environmental benefits and economic costs (Upton Jr. & Snyder, 2017; Greenstone et al., 2019; Wiser et al., 2017). Despite extensive research, studies simultaneously examining multiple renewable energy types using long-term, high-frequency data and frequency-domain methods remain limited. This study addresses this gap through spectral causality analysis, capturing frequency-dependent and time-varying relationships.

Design / Methodology

The study employs a time-series econometric framework based on monthly U.S. data for 1984:01–2025:09. CO₂

emissions serve as the dependent variable, while renewable energy consumption is disaggregated into biofuels, hydroelectric, waste, wood, and solar energy. Data are primarily obtained from the U.S. Energy Information Administration (EIA) and related sources (EIA, 2026; IEA, 2022). The empirical analysis proceeds in stages. First, stationarity is tested using structural break unit root tests, Zivot–Andrews (1992) and Perron (1997), accounting for structural changes; all variables are found stationary in levels. Second, the Breitung and Candelon (2006) spectral causality test is applied, decomposing causality across frequency bands and distinguishing short-, medium-, and long-term effects. This approach provides a more comprehensive understanding of dynamic interactions than conventional causality tests (Taştan, 2015; Fromentin & Tadjeddine, 2020). Optimal lag length is determined using the Akaike Information Criterion (AIC).

Findings

The findings show that the relationship between renewable energy consumption and CO₂ emissions is not homogeneous across frequencies and varies by time horizon. Causality from CO₂ emissions to renewable energy consumption is stronger and observed over a broader range of frequencies across all energy types, indicating that environmental pressures and carbon reduction policies significantly shape energy consumption patterns (Sadorsky, 2009; Salari et al., 2021). In contrast, causality from renewable energy consumption to CO₂ emissions is more limited, fragmented, and dependent on energy type. Biofuels and solar energy exhibit stronger long-term effects, suggesting structural and cumulative impacts on emissions (Kim et al., 2020; Bilgili, 2012), although biofuels' net carbon effects may be context-dependent (Grafton et al., 2014; DeCicco et al., 2016). Hydroelectric and waste-based energy are more sensitive to short-term fluctuations, implying impacts driven by operational dynamics (Holland et al., 2022). Wood-based energy shows an irregular, frequency-dependent pattern reflecting biomass variability (Bilgili et al., 2016; Kim et al., 2020).

Conclusion and Implications

Overall, the results demonstrate that the energy–environment nexus is dynamic, multidimensional, and dependent on both energy type and time horizon. These findings highlight the importance of designing time-sensitive and energy-specific policies. The study also provides implications for achieving Sustainable Development Goals, particularly SDG 7 (Affordable and Clean Energy) and SDG 13 (Climate Action) (UNDP, 2015).