



TÜRKİYE’DE REKABETÇİ ENDÜSTRİYEL PERFORMANS İLE ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ARASINDAKİ ASİMETRİK İLİŞKİ: İNOVASYON VE YENİLENEMEYEN ENERJİ VERİMLİLİĞİ SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇEVRE İÇİN ÖNEMLİ Mİ?

Mehmet ASLAN¹

Öz

Günümüzde sanayi ve enerji politikalarının çevresel sürdürülebilirlik ile uyumlu hale getirilmesi hem ekonomik büyüme hem de ekolojik denge açısından büyük bir önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı, rekabetçi endüstriyel performans endeksinin, inovasyonun ve yenilenemez enerji verimliliğinin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Çalışmada, 1990-2021 yıllarına ait veriler kullanılarak kesirli Fourier doğrusal olmayan ARDL (NARDL) yöntemi uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, yenilenemez enerji verimliliği çevresel kaliteyi artırırken, inovasyonun ekonomik büyümeye öncelik verilmesi nedeniyle çevresel kaliteyi olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca, rekabetçi endüstriyel performans endeksindeki dalgalanmaların çevresel kaliteyi kötüleştirdiği tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, sanayi sektöründe yenilenebilir enerjiye geçiş teşvik edilmeli, fosil yakıt kullanımı azaltılmalı ve çevresel etkiler göz önünde bulundurularak sürdürülebilir sanayileşmeyi destekleyen yasal düzenlemeler hayata geçirilmelidir.

Anahtar Kelimeler: Yük Kapasitesi Faktörü, Rekabetçi Endüstriyel Performans, İnovasyon
JEL Sınıflandırması: C32, Q13, F18

ASYMMETRIC RELATIONSHIP BETWEEN COMPETITIVE INDUSTRIAL PERFORMANCE AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY IN TURKEY: ARE INNOVATION AND NON-RENEWABLE ENERGY EFFICIENCY IMPORTANT FOR A SUSTAINABLE ENVIRONMENT?

Abstract

Ensuring the alignment of industrial and energy policies with environmental sustainability has become increasingly important for economic growth and ecological balance. This study investigates the effects of the competitive industrial performance index, innovation, and non-renewable energy efficiency on environmental sustainability. The study employs the fractional Fourier nonlinear ARDL (NARDL) method using data from 1990 to 2021. According to the empirical analysis results, while the efficiency of non-renewable energy positively impacts environmental quality, innovation has a negative effect due to the prioritization of economic growth over environmental sustainability in Turkey. Additionally, fluctuations in the competitive industrial performance index have been found to deteriorate environmental quality. In this context, policies promoting the transition to renewable energy in the industrial sector should be implemented, fossil fuel consumption should be reduced, and legal regulations supporting sustainable industrialization should be enacted with consideration of environmental impacts.

Keywords: Load Capacity Factor, Competitive Industrial Performance, Innovation
JEL Classification: C32, Q13, F18

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Artvin Çoruh Üniversitesi, mehmetaslan@artvin.edu.tr, ORCID:0000-0002-7455-5354.

1. Giriş

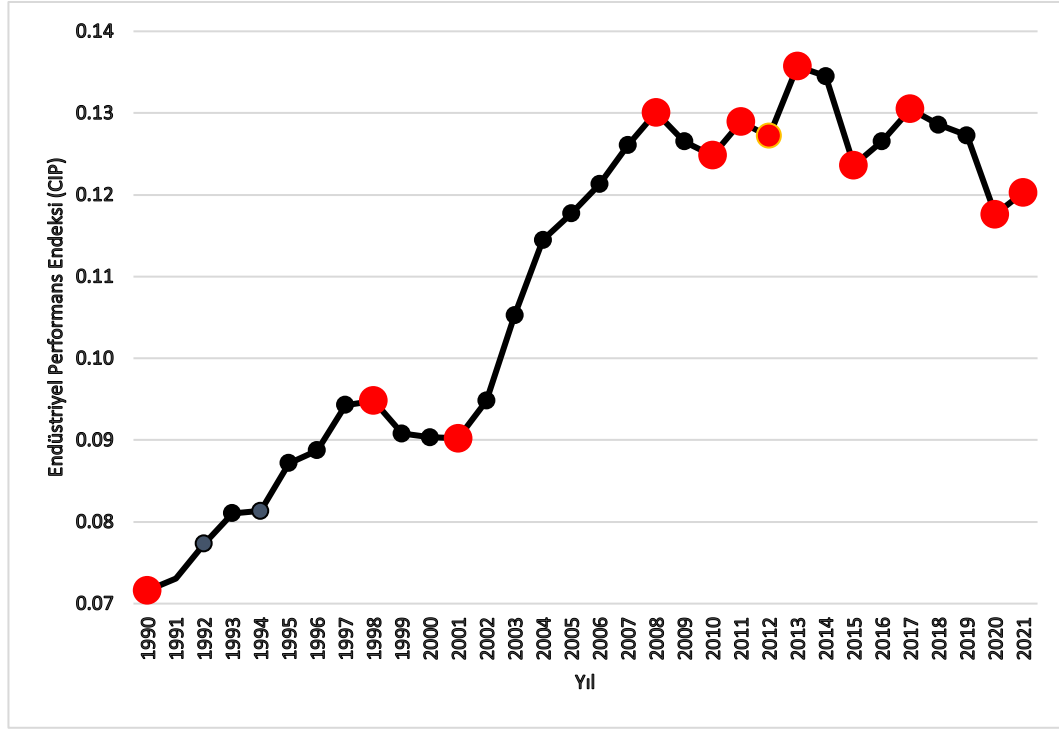
On dokuzuncu yüzyıldan itibaren başlayan sanayileşme ile birlikte birçok ülke ekonomik büyüme sürecine girmiştir. Bu büyüme, istihdam yaratarak ülkelerin refah düzeyini artırmış ve pek çok ülkenin ekonomik ve toplumsal istikrara ulaşmasına katkı sağlamıştır. Ancak bu süreç, çevre üzerinde önemli bir maliyet oluşturmuş ve çevresel kaliteye dair ciddi endişelere yol açmıştır (Usman vd., 2022: 239–240). Ekonomik büyüme, doğal kaynakların yoğun kullanımı ve özellikle fosil yakıtlara dayalı enerji tüketimindeki artış nedeniyle, karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yüksek seviyelere ulaşmasına neden olmaktadır. Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların kullanımı CO₂ emisyonlarını artırmaktadır. Bunun yanı sıra, bu tür yakıtların yoğun kullanımı hava ve su kirliliğine yol açarak hem insan sağlığını hem de doğal çevreyi olumsuz etkilemektedir (Jahanger vd., 2022: 2). Bu durumun farkına varan birçok ülke, dikkatini sürdürülebilir enerji kaynaklarına ve enerji verimliliğini artıracak teknolojik yeniliklere yöneltmiştir (Çağlar ve Yavuz, 2023: 1–2). Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması kadar, halen yaygın biçimde kullanılan fosil yakıtların daha verimli şekilde kullanılmasını sağlayacak inovasyonlar da çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Bir ülkede çevresel kaliteyi etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar arasında rekabetçi endüstriyel performans endeksi (CIP), yenilenebilir ve yenilenemez enerji kullanımı ile inovasyon ön plana çıkmaktadır. Bu faktörlerden biri olan CIP, bir ülkenin üretim ve ihracat potansiyelini, sanayileşme düzeyini ve küresel pazar üzerindeki etkisini ölçen bir göstergedir (Subochev & Zakhlebin, 2016: 6–7). CIP, ülkelerin endüstriyel performanslarını karşılaştırma imkânı sunarak, politika yapıcılara strateji geliştirme sürecinde yol gösterici olabilir. Bu kapsamda, karar alıcılar CIP endeksinden yararlanarak sanayi sektöründe verimliliği artırmaya ve sürdürülebilir ekonomik büyümeyi teşvik etmeye yönelik politikalar geliştirebilirler (Upadhyaya, 2019: 36–37).

Endüstriyel rekabet avantajına sahip ülkeler, verimliliği artırarak ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayan ileri teknolojileri benimseyerek bu üstünlüklerini koruyabilir. Bir ülke endüstriyel rekabet gücünü artırmaya odaklandığında, genellikle sanayileşmenin çevresel etkilerini azaltan yenilikçi teknolojilere yatırım yapma eğilimindedir (Porter, 1990: 82). Bu yaklaşım, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinden biri olan ve sürdürülebilir sanayileşme ile inovasyonu vurgulayan SDG 9 açısından kritik bir öneme sahiptir (Kynčlová vd., 2020: 2). Endüstriyel rekabet gücündeki artış, ekonomik büyümeyi destekler. Ancak sanayileşmenin erken aşamalarında ve kişi başına düşen milli gelirin belirli bir eşiğin altında kaldığı durumlarda, endüstriyel faaliyetler CO₂ salınımını, hava, su ve toprak kirliliğini artırarak çevresel kaliteyi olumsuz etkileyebilir (Sohag vd., 2017: 9755). Bu tür durumlarda, çevreye duyarlı teknolojilerin ve yenilenebilir enerji kaynaklarının benimsenmesi, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından kritik önem taşır. Bu uygulamalar, CO₂ emisyonlarını ve fosil yakıt bağımlılığını azaltarak endüstriyel büyümeyi çevresel koruma ile uyumlu hâle getirir. Bu bağlamda, CIP düzeyindeki artış yalnızca SDG 9'un gerçekleştirilmesine değil; aynı zamanda SDG 1 (yoksulluğun azaltılması), SDG 7 (erişilebilir ve temiz enerji), SDG 8 (insana yakışır iş ve ekonomik büyüme), SDG 10 (eşitsizliklerin azaltılması) ve SDG 13 (iklim eylemi) gibi hedeflerin başarılmasına da katkı sunabilir. Dolayısıyla, CIP düzeyindeki yükselme hem kaynakların verimli kullanımını destekler hem de çevresel sürdürülebilirlik ve küresel kalkınma hedeflerine ulaşılmasını önemli ölçüde destekler.

Sanayi sektörü, Türkiye gibi gelişmekte olan ekonomilerde ekonomik büyüme ve kalkınmanın gerçekleşmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Sınırlı kaynaklara sahip olan bir ekonomide, kaynakların etkili ve verimli olarak ele alınması şeklinde tanımlanan endüstriyel rekabet gücü (CIP), sadece mamul malları üretme ve bu ürünleri ihraç etme kapasitesini değil, aynı zamanda teknolojik gelişmişliğini de yansıtır (Rasheed vd. 2024: 2). Türkiye, 1980 yıllarından itibaren uyguladığı dışa açık sanayileşme politikası çerçevesinde endüstriyel rekabet gücünde önemli iyileşmeler görülmüştür. Türkiye'nin CIP indeks değerinin zaman içerisindeki seyri Grafik 1'de gösterilmektedir.

Grafik 1: CIP İndeksi Zaman Yolu Grafiği



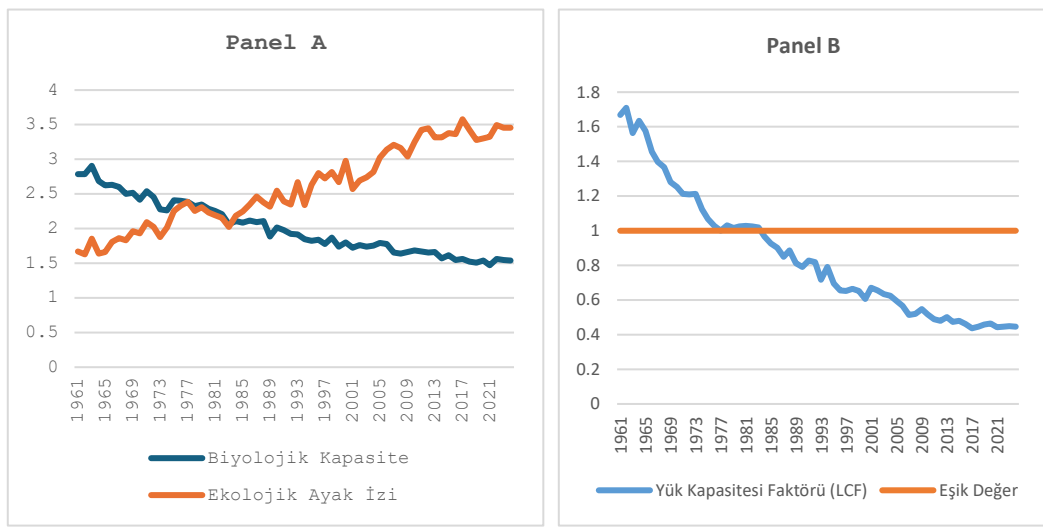
Kaynak: (UNIDO, t.y.).

Grafik 1 incelendiğinde, Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü (UNIDO) verilerine göre, Türkiye'nin CIP sıralaması 1990 – 2022 yılları arasında 19 sıra yükselerek 39. sıradan 24. sıraya yükselmiştir. Türkiye'nin bu başarısında, piyasa odaklı reformların gerçekleştirilmesi, özellikle Avrupa Birliği (AB) ile olan gümrük birliği anlaşmasının yapılması gibi faktörler etkili olmuştur. CIP değişkenin artış trendine rağmen zamanla ekonomide meydana gelen olaylara bağlı olarak pozitif ve negatif şoklara maruz kalmıştır. CIP değişkeninde, 1990'dan 1998'e, 2001'den 2008'e, 2010'dan 2011'e, 2012'den 2013'e, 2015'ten 2017'ye ve 2020'den 2021'e artış meydana gelirken, 1998'den 2001'e, 2008'den 2010'a, 2011'den 2012'ye, 2013'ten 2015'e ve 2017'den 2020'ye azalma eğilimindedir. CIP'te değişmelerin çevresel kalite üzerindeki etkisi incelenirken pozitif ve negatif şokların etkileri de analize dahil edilmiştir.

Türkiye'de endüstriyel rekabet gücünün artmasının çevresel etkilerini ortaya koyabilmek için araştırmacılar tarafından geliştirilen çeşitli ölçüm araçları kullanılmaktadır. Literatürdeki ilk çalışmalar çevresel bozulmayı ortaya koyabilmek için sera gazlarını (CO₂) gösterge olarak dikkate almışlardır. Ancak CO₂ emisyonları çevreyi sadece hava kalitesi bakımından dar kapsamlı olarak değerlendirmektedir. Rees (1992) arazi dönüşümünü, orman varlığını, su kaynaklarını ve CO₂ gibi değişkenleri içerecek şekilde daha kapsamlı bir gösterge olarak ekolojik ayak izini (EF) kullanmıştır. Ancak insanoğlunun doğaya olan taleplerinin ne kadarının doğa tarafından karşılanacağını gösteren bir ölçüt olarak EF, çevrenin sadece talep tarafını dikkate almaktadır (Güloğlu vd. 2023: 92). EF, çevrenin biyolojik kapasitesini dikkate almadığı için EF ölçütünün yerine çevresel kaliteyi daha kapsamlı ele alan yeni bir ölçüt ihtiyacı doğmuştur. Bu doğrultuda Siche vd. (2010) çevrenin hem arz hem de talep tarafını dikkate alan Yük Kapasitesi Faktörünü (LCF) geliştirmişlerdir. LCF, Biyolojik kapasitenin EF'ye oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Bulunan oran birden küçükse, doğanın insanoğlunun talebini karşılayamayacağı, birden büyükse çevrenin sürdürülebilir olduğu anlamına gelir (Siche vd. 2010: 3184 – 3186). Eşik değer, biyolojik kapasitenin ekolojik ayak izine eşit olduğu durumu ifade eder. Grafik 2'de Türkiye'nin çevresel göstergeleri gösterilmektedir.

Grafik 2’de panel A incelendiğinde, 2021 yılında Türkiye’nin kişi başına düşen 3.35 küresel hektar (gha) EF’ye ve kişi başına düşen 1.49 küresel hektar (gha) biyolojik kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir. Kentleşme, ekonomik büyüme ve artan enerji tüketimi kişi başına düşen 1.86 gha’lık toplam ekolojik açığa neden olmaktadır. Türkiye ekonomisi büyümeye devam etmesi durumunda, doğanın sunduğu kaynaklardan yaklaşık 2 kat daha fazla kaynağa ihtiyaç duyabilecektir. Panel B’de LCF’nin zaman yolu grafiği görülmektedir. 1961 yılından 1983 yılına kadar biyolojik kapasite EF’nin üzerinde seyretmiştir. 1983 yılından itibaren ise ekolojik açık artmaya başlayarak eşik değerinden uzaklaşmaya devam etmiştir. Panel A ve Panel B birlikte değerlendirildiğinde Türkiye’de doğanın sunduğu kaynak miktarından gittikçe daha fazla kaynak tüketildiğini göstermektedir.

Grafik 2: Türkiye’nin Çevresel Göstergeleri



Kaynak: (Global Footprint Network, t.y.).

Çok sayıda araştırmada, inovasyonun temsilcisi olarak patent başvuruları veya Ar – Ge harcamaları dikkate alınmaktadır (Balsobre-Lorente vd. 2018; Herrerias vd. 2016). Türkiye’de araştırma geliştirme (Ar – Ge) harcamalarının milli gelire oranı 1996 yılında %0.5 iken her yıl artarak 2021 yılında %1.4 seviyelerine ulaşmıştır. Ar – Ge harcamalarının artışına paralel olarak patent sayısı da sürekli artmıştır. Türkiye’de, 1980’den 2021’e kadar, yerleşik olanların patent sayısı 134’ten 8.234’e yükselmiştir (Dünya Bankası 2022). Patent sayısındaki bu artış, politika yapıcılarının patent faaliyetlerini teşvik eden bilgi ve iletişim teknolojilerine yaptığı yatırımlarla açıklanabilir. Türkiye’de yerleşik olmayanların patent sayıları 1980’de 527 iken 2000 yılında zirve yaparak 3.156’ya yükselmiş, 2021 yılında ise azalarak 242 olmuştur. Bu durum Türkiye’nin yabancı inovasyonlardan yeterince yararlanamadığını göstermektedir. World Intellectual Property Organization (2024) verilerine göre, patent başvurularında Türkiye Letonya’dan sonra 37. Sırada yer almaktadır. Türkiye’de inovasyonun (Patent sayısı ve Ar – Ge harcamaları) hızlı artmasına rağmen, yapılan çalışmalarda yük kapasitesi faktörü ile inovasyon arasındaki ilişkiye yeterince odaklanılmadığı görülmektedir. Oysa inovasyon, enerji ve çevre ekonomisinde önemli bir rol oynayarak çevre kalitesi üzerinde önemli etkilere sahip olabilir (Alvarez-Herranz, vd. 2017: 387 – 388).

Bu çalışma, inovasyon, endüstriyel faaliyetler ve yenilenemeyen enerji verimliliği ile yük kapasitesi faktörü arasındaki ilişkileri inceleyerek ekonomik faaliyetlerin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik olarak neler yapılması gerektiği konusunda bilgi sağlamayı amaçlamaktadır. Çalışmanın literatüre katkıları şunlardır; 1) Türkiye’de CIP ’teki değişimleri NARDL yaklaşımı ile pozitif ve negatif şoklara ayırıp, söz konusu şokları LCF bağlamında ele alan çalışmaya

rastlanmamıştır. II) CIP'teki yapısal kırımları dikkate almak için Fourier terimleri NARDL yaklaşımına dahil edilerek eş bütünleşme ilişkisi hesaplanarak daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. III) Çalışmada, çevresel kalite ölçütü olarak doğanın hem arz hem de talep yönlerini değerlendiren LCF dikkate alınmış olup, bu yaklaşım Türkiye'nin başta SDG 9'un "Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı" hedefi başta olmak üzere diğer SDG'lerin ilerlemesinin izlemesine olanak sağlamaktadır.

Bu makalenin özel amaçları doğrultusunda, bazı sorulara özel olarak yanıt aranmaktadır: (I) CIP ile çevre kalitesi arasında doğrusal olmayan bir ilişki var mıdır? (II) İnovasyondaki gelişmeler çevresel kaliteyi nasıl etkiler? (III) Çevreyi en çok kirleten Fosil kaynaklara dayalı enerji tüketiminde, verimliliği artırarak çevresel kalite iyileştirilebilir mi?

Çalışmanın geri kalanında, önce araştırmanın teorik çerçevesi ile ilgili literatür özeti sunulmuş, ardından kullanılan veri seti ve kurulan model açıklanmıştır. Devamında, uygulanan ekonometrik yöntemler tanıtılmış ve elde edilen ampirik bulgulara yer verilmiştir. Bu bulgular tartışılarak yorumlanmış, son olarak çalışmadan elde edilen sonuçlara dayalı politika önerileri geliştirilmiştir.

2. Teorik Çerçeve ve Literatür Özeti

2.1. Teorik Çerçeve

Endüstriyel faaliyetler, sanayileşmenin ilk aşamalarında enerji talebindeki ve kaynak tüketimindeki artış nedeniyle çevresel kaliteyi düşürür (Hussain ve Zhou, 2022: 59484 – 59484). Sanayileşme ile birlikte milli gelir düzeyi artar ve ekonomiler çevreye karşı daha duyarlı hale gelirler. Bu duyarlılık, ekolojik ayak izini azaltan, çevresel kaliteyi artıran teknolojilerin benimsenmesine yol açabilir (Usman ve Balsobre-Lorente, 2022: 1 – 2). Bu kapsamda çevresel sürdürülebilirliği ölçmede geleneksel göstergelere ek olarak son yıllarda yük kapasitesi faktörü (LCF) yaygın biçimde kullanılmaktadır. LCF, bir ülkenin biyolojik kapasitesinin ekolojik ayak izine oranı olup, çevresel performansı değerlendirmede kapsamlı bir göstergedir. LCF değerinin 1'in altına düşmesi, doğanın taşıma kapasitesinin aşıldığını ve çevresel kalitenin bozulduğunu; 1'in üzerinde olması ise sürdürülebilir bir çevresel dengeye işaret eder (Siche vd., 2010: 3184–3186).

Rekabetçi sanayi performansı ile çevresel sürdürülebilirlik arasında kurulan bağ, bu noktada önem kazanmaktadır. Özellikle Rekabetçi Endüstriyel Performans Endeksi (CIP), bir ülkenin sanayideki rekabet gücünü ve üretkenliğini ölçen bileşik bir göstergedir. CIP değeri yüksek olan ülkelerde, üretim ve ihracat yoğunluğu artarken, bu durum çevresel baskıyı artırabilecek ölçek etkilerini beraberinde getirebilir. Nitekim Grossman ve Krueger (1991), ekonomik büyümenin erken aşamalarında çevresel bozulmanın kaçınılmaz olduğunu savunmuştur. Benzer şekilde Güneysu (2023), Türkiye özelinde sanayi üretimindeki artışın LCF değerini düşürdüğünü, yani çevresel sürdürülebilirliği olumsuz etkilediğini göstermektedir. Ancak bu olumsuz eğilim kaçınılmaz değildir. Porter hipotezi, iyi tasarlanmış çevre düzenlemelerinin firmaları inovasyona teşvik ederek hem kaynak verimliliğini artırabileceğini hem de kirliliği azaltabileceğini ileri sürer (Sun, vd. 2024: 1 – 2). Bu bağlamda, çevre dostu yeni teknolojilerin benimsenmesi, verimliliği artırarak rekabet gücünü koruma ve çevresel kaliteyi artırma potansiyeli taşımaktadır. Çünkü rekabetçi performansta üstün olan endüstriler bu konumlarını koruyabilmek için bilgi – iletişim teknolojisi ve yapay zekâ (AI) gibi gelişmelerden faydalanarak kaynak tüketimini azaltabilir (Charfeddine ve Umlai, 2023: 2 – 3). Bu noktada inovasyon, Ar-Ge faaliyetleri ve yenilenebilir enerji yatırımları önemli bir rol üstlenmektedir. Dogan ve Pata (2022), G7 ülkelerinde bilgi ve iletişim teknolojisi altyapısı ile Ar-Ge harcamalarının ve yenilenebilir enerji kullanımının LCF'yi artırdığını, yani çevresel kaliteyi olumlu etkilediğini tespit etmiştir. Dolayısıyla, ülkeler inovasyonlara kaynak ayırarak hem çevresel kaliteyi iyileştirebilir hem de pazardaki rekabet güçlerini koruyabilirler.

Öte yandan, ekonomik büyüme ile birlikte üretim faaliyetlerinin artması enerji talebini de artırmakta, bu talep büyük ölçüde kömür, doğalgaz ve petrol gibi fosil yakıtlardan karşılanmaktadır (Hanif vd. 2019: 493 – 494). Fosil kaynaklı yenilenemeyen enerjiye bağımlılık, yalnızca hava ve su kirliliğine değil, aynı zamanda iklim değişikliğine de katkıda bulunarak çevresel sürdürülebilirliği tehdit etmektedir (Li vd. 2023: 79 – 80). Bu nedenle, yenilenebilir ve düşük karbonlu enerji

kaynaklarına geçiş kaçınılmaz hale gelmiştir (Noor vd. 2024: 14622). Bu geçişte, enerji verimliliği kritik bir rol oynamaktadır. Yeşil enerji ve yeşil teknoloji kullanımı, enerjinin daha az kaynakla daha etkin kullanılması sayesinde çevresel baskıyı azaltabilir (Akram vd. 2020; He vd. 2021; Ehigiamusoe ve Dogan 2022; Mirza vd. 2022). Enerji verimliliği yalnızca çevresel korumayı desteklemekle kalmaz, aynı zamanda işletmeler için maliyet tasarrufu sağlar (Zhu vd. 2016: 238). İşletmeler enerjiyi verimli kullandıklarında daha az enerjiyle daha fazla üretim yapabilir, bu da genel enerji talebini düşürür ve sürdürülebilirliği destekler (Pao ve Tsai, 2010: 7857).

Türkiye özelinde yapılan çalışmalar da bu eğilimi doğrulamaktadır. Enerji verimliliğindeki artışın, karbon salımlarını ve ekolojik ayak izini azaltarak LCF'yi yükselttiği, dolayısıyla çevresel sürdürülebilirliği desteklediği tespit edilmiştir (Kazemzadeh vd., 2022; Özbüğday ve Erbaş, 2015).

Sonuç olarak, rekabetçi sanayi performansı, inovasyon faaliyetleri, enerji verimliliği ve çevre politikaları arasındaki denge, LCF gibi çevresel kalite göstergelerinin yönünü belirlemektedir. Sanayi stratejilerini yeşil teknoloji, çevreye duyarlı inovasyon ve enerji etkinliği odaklı belirleyen ülkeler, Porter hipotezinin öngördüğü gibi, rekabet gücünden ödün vermeden çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirme potansiyeline sahiptir.

2.2. Literatür Özeti

Son yıllarda literatürde çevresel kalite ile sürdürülebilirlik arasındaki ilişki giderek daha fazla kabul görmekte ve araştırmacıların büyük ilgisini çekmektedir. Bu çalışma, çevresel kalite ve sürdürülebilirliği etkileyen çeşitli faktörleri incelemeyi amaçlamaktadır. Bu faktörler arasında bir ülkenin üretim ve ihracat potansiyelini, sanayileşme yoğunluğunu ve küresel pazar üzerindeki etkisini ölçen CIP değişkeni, üretimde verimliliği ve çevresel sürdürülebilirliği artırmadaki rolünü ortaya koyan inovasyon değişkeni (INOVA), fosil kaynaklara dayalı yenilenemez enerji verimliliği (FEV) değişkeni yer almaktadır. Çalışma, çevresel kalite ve sürdürülebilirlik ilişkisini incelerken çevrenin hem arz hem de talep tarafını dikkate alan yük kapasitesi faktörüne odaklanmaktadır.

Literatürde fosil kaynaklara dayalı yenilenemez enerji verimliliğinin çevresel kalite üzerindeki etkisini araştıran sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Çalışmalarda enerji verimliliğinin ölçütü olarak enerji yoğunluğu ve milli gelirin fosil kaynaklara dayalı enerji tüketimine oranlanması elde edilen değerler kullanılmıştır. Enerji verimliliğinin ölçütü olarak enerji yoğunluğunu ele alan çalışmalardan bazıları; Tajudeen vd. (2018) 30 OECD ülkesi için, Akram vd. (2020) gelişmekte olan 66 ülke için, Fakher vd. (2023) BRICS ülkeleri için, Chen vd. (2024) enerji verimliliği en yüksek 10 ülke için enerji verimliliğinin çevresel kaliteyi artırdığını tespit etmişlerdir. Ancak Shokoohi vd. (2022) Orta Doğu ülkeleri için yapmış oldukları çalışmada sera gazı salınımlarının enerji verimliliği ile ilişkili olmadığını tespit etmişlerdir. Enerji verimliliğinin ölçütü olarak milli gelirin fosil kaynaklara dayalı enerji tüketimine oranlanması şeklinde ele alan çalışmalardan bazıları; Jahanger vd. (2023) 29 Avrupa ülkesi için, Zhou vd. (2023) Çin için, Kazemzadeh vd. (2022) 16 gelişmekte olan ülke için enerji verimliliğinin çevresel kaliteyi artırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca Özbüğday ve Erbaş (2015) çalışmalarında OECD ülkelerinde enerji verimliliği ve yenilenebilir enerjinin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar 36 ülkede enerji verimliliği endeksleri oluşturmuşlar ve enerji verimliliğindeki %1'lik bir artışın CO₂ emisyonlarını %0,55 oranında azalttığı sonucuna varmışlardır.

Birçok çalışma, Ar-Ge harcamalarını bir ölçüt olarak kullanarak inovasyonun çevresel etkilerini incelemektedir. Shahbaz vd. (2020), İngiltere için 1870–2017 dönemine ait verilerle yaptıkları çalışmada, Ar-Ge harcamaları ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi analiz etmişlerdir. Bootstrap ARDL modeli kullanılarak elde edilen bulgular, Ar-Ge harcamalarının İngiltere’de CO₂ emisyonlarını azalttığını göstermektedir. Bu doğrultuda yazarlar, İngiltere’nin 2050 karbon nötrlüğü hedeflerine ulaşabilmesi için inovasyona daha fazla yatırım yapılmasını önermektedir. Benzer şekilde, Koçak ve Alnour (2022), ABD için 1981–2020 dönemine ait verileri doğrusal olmayan ARDL (NARDL) yaklaşımıyla analiz ederek, Ar-Ge harcamalarının çevresel kaliteyi artırdığını vurgulamışlardır. Adedoyin vd. (2020) Avrupa Birliği ülkeleri, Alam vd. (2021) OECD ülkeleri, Cho ve Sohn (2018)

Fransa, Almanya, İtalya ve İngiltere, Fernández vd. (2018) Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri ve Çin, Ang (2009) ise Çin üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarda, Ar-Ge harcamalarının çevresel kaliteyi iyileştirdiği sonucuna ulaşmışlardır. Bununla birlikte, bazı çalışmalarda Ar-Ge harcamalarının çevresel kalite üzerindeki etkisi belirsizdir. Örneğin, Petrović ve Lobanov (2020), 16 OECD ülkesi üzerinde yaptıkları analizde Ar-Ge harcamalarının bu ülkelerin %60'ında CO₂ emisyon yoğunluğunu azalttığını, ancak geri kalan %40'ında bu etkiye sahip olmadığını belirtmişlerdir. Bu durum, Ar-Ge'nin çevresel etkisinin her ülke için aynı doğrultuda olmayabileceğine işaret etmektedir. Benzer şekilde, Koçak ve Ulucak (2019), 19 yüksek gelirli OECD ülkesi için 2003–2015 dönemini kapsayan çalışmalarında, Ar-Ge harcamalarının karbonsuzlaştırma politikaları üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığını ortaya koymuşlardır. Fernández vd. (2018) ise Ar-Ge harcamalarının AB ve ABD'de CO₂ emisyonlarını azaltırken, Çin'de artırdığını tespit etmiştir.

Literatürdeki birçok çalışmada patent başvuru sayıları, inovasyonun bir göstergesi olarak kullanılarak çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Ancak inovasyonun (patent başvurularının) çevresel etkileri karmaşık ve bağlama bağlıdır. Bazı çalışmalarda, patent başvurularının çevresel kaliteyi artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Örneğin, Mensah vd. (2018), 28 OECD ülkesi için 1990–2014 dönemine ait verileri ARDL yöntemiyle analiz ederek, enerji patentlerinin CO₂ emisyonlarını azalttığını belirlemiştir. Benzer şekilde Zhou vd. (2017), Çin için 2004–2014 verilerini kullanarak yaptıkları analizde, teknolojik patentlerin kükürt dioksit (SO₂) emisyonlarını düşürdüğünü ve çevresel kaliteyi iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Kirikkaleli ve Adebayo (2021), 1990–2018 döneminde teknolojik yenilik ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi DOLS ve spektral nedensellik yöntemleriyle incelemiş ve patent başvuru sayısının CO₂ emisyonlarını azalttığını göstermiştir. Khan vd. (2020), 1970–2017 verileriyle Çin'deki teknolojik yenilik ve CO₂ emisyonları ilişkisini ARDL yöntemiyle analiz etmiş ve patent başvurularının CO₂'yi azalttığını tespit etmiştir. Kihombo vd. (2021) Batı Asya ve Orta Doğu ülkeleri; Tang ve Tan (2013) Malezya; Görmüş ve Aydın (2020) ise en yenilikçi 10 ülke için benzer sonuçlara ulaşmıştır.

Buna karşılık bazı çalışmalarda patent başvurularının çevresel kalite üzerinde olumsuz etkileri olduğu belirtilmiştir. Adebayo vd. (2022), Portekiz için 1980–2019 dönemini kapsayan çalışmalarında, patent başvurularının çevresel kaliteyi azalttığını ifade etmiştir. Benzer şekilde Adebayo vd. (2021), Şili için doğrusal olmayan ARDL (NARDL) yöntemiyle yaptıkları analizde, teknolojik yeniliğin tüketime dayalı karbon emisyonlarını azaltmada etkili olmadığını ve bu durumun, Şili'deki yenilik faaliyetlerinin yeşil teknolojiye odaklanmamasından kaynaklandığını vurgulamıştır. Cheng ve Yao (2021) da Çin için benzer bulgulara ulaşmıştır. Ganda (2019), 2000–2014 dönemine ait OECD ülkeleri verilerini kullanarak inovasyon ve teknoloji yatırımlarının CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada Ar-Ge harcamaları ile CO₂ emisyonları arasında negatif ve anlamlı bir ilişki saptanırken, patent sayısı ile emisyonlar arasında pozitif ve anlamlı bir ilişki bulunmuştur.

Literatürde, Türkiye'de inovasyon ile çevresel sürdürülebilirlik ilişkisini, özellikle yük kapasitesi faktörü (LCF) bağlamında ele alan çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Shan vd. (2021), 1990–2018 dönemine ait verilerle STIRPAT modeline dayalı yaptıkları analizde, inovasyonun karbondioksit emisyonlarını azaltıcı etkisini ortaya koymuştur. Oğuztürk ve Özbay (2022), 2000–2017 dönemi için BRICS ülkeleri ve Türkiye'yi kapsayan panel veri analizinde, inovasyonun yenilenebilir enerji arzı (YEK) üzerindeki etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, Brezilya ve Türkiye'de inovasyon ile YEK arasında pozitif ve güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir. Öte yandan, yeşil inovasyonun YEK üzerindeki etkisinin Rusya, Çin, Hindistan ve Güney Afrika için istatistiksel olarak anlamlı olmadığı saptanmıştır. Özkan vd. (2023), 1990–2018 dönemine ait yıllık zaman serisi verilerini kullanarak Dinamik ARDL simülasyon yöntemi ile inovasyonun çevresel kalite üzerindeki etkisini değerlendirmiş; sonuçlar, inovasyonun çevresel kaliteyi artırdığını göstermiştir. Benzer biçimde, Qoyash ve Eren (2022), 1990–2019 döneminde inovasyon ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi analiz etmiş ve inovasyonun çevresel kaliteyi olumsuz yönde etkilediği sonucuna ulaşmıştır.

Endüstriyel faaliyetlere ilişkin çalışmalar, endüstrileşmenin çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratabildiğini ortaya koymaktadır. Rasheed vd. (2024), gelişmekte olan yedi Asya ülkesi için rekabetçi endüstriyel performansın ekolojik ayak izi üzerindeki etkisini panel NARDL ve asimetrik panel nedensellik yöntemleriyle incelemiştir. Bulgular hem olumlu hem de olumsuz şokların karbon ayak izini azaltıcı yönde etkili olduğunu göstermektedir. Çağlar ve Aşkın (2023), 1990–2018 döneminde ilk 10 CIP ekonomisine yönelik gerçekleştirdikleri çalışmada CUP-FM ve CUP-BC gibi tahmin tekniklerini kullanarak, rekabetçi endüstriyel performansın yük kapasitesi faktörü üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Elde edilen sonuçlar, CIP'in çevresel kaliteyi olumsuz etkilediğine işaret etmektedir. Yuhuan vd. (2024) ise, 1997–2019 döneminde ilk 10 yüksek gelirli ekonomi için CO₂, CIP ve çeşitli çevresel göstergeler arasındaki ilişkileri araştırmıştır. Çalışma, CIP'in CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azalttığını ve çevresel bozulmayı sınırlandırmada etkili olduğunu ortaya koymuştur. Türkiye özelinde gerçekleştirilen çalışmada, Çağlar vd. (2024a), 1990–2022 dönemi verilerini kullanarak rekabetçi endüstriyel performans ile çevresel kalite (LCF) arasındaki ilişkiyi ve LCC hipotezinin geçerliliğini test etmiştir. Elde edilen bulgular, rekabetçi endüstriyel performansın çevre kalitesini artırdığını ve LCC hipotezinin Türkiye için geçerli olduğunu göstermektedir.

Literatür değerlendirildiğinde, Türkiye'de CIP, INOVA bağımsız değişkenlerinin çevresel etkilerini LCF bağlamında ele alan çalışmaların sayısı oldukça az olduğu görülmektedir. Türkiye'de CIP ile LCF arasındaki ilişkiyi araştıran tek bir çalışmaya rastlanmıştır. Çağlar, vd. (2024a) yapmış oldukları çalışmadan farklı olarak bu çalışma, Fourier terimleri eklenerek oluşturulan doğrusal olmayan ARDL (NARDL) modelini kullanarak CIP değişkeni pozitif ve negatif şoklarına ayırmakta ve LCF üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenerek literatüre katkı sağlamaktadır. Ayrıca literatürde Türkiye özelinde yenilenemeyen enerji verimliliğinin LCF bağlamında çevresel kalite üzerindeki etkisini araştıran bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu bağlamda çalışma literatürdeki boşluğu doldurmaktadır.

3. Veri ve Model

Çalışma, Türkiye'de rekabetçi endüstriyel performansın yük kapasite faktörü üzerindeki asimetrik davranışlarını ve inovasyonun çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini 1990 – 2021 dönemi arasındaki yıllık verilerle incelemeyi amaçlamaktadır. Bu amaca ulaşmak için kullanılan değişkenler Tablo 1'de verilmiştir.

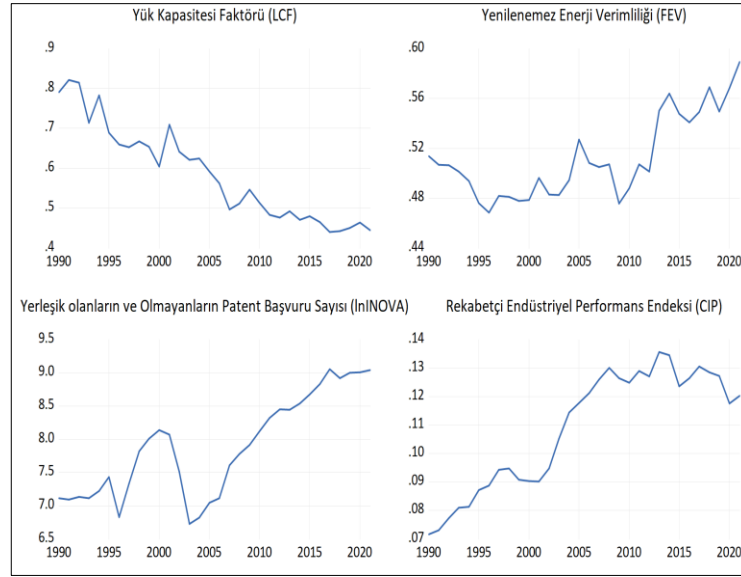
Tablo 1: Verilerin Açıklanması

Seriler	Serilere İlişkin Açıklamalar	Serilerin Kaynağı
LCF	Kişi başına düşen Yük kapasitesi faktörü (Biyokapasite/Ekolojik ayak izi)	GFN
FEV	Yenilenemeyen Enerji Verimliliği	OWD, WDI
InNOVA	İnovasyon (Yerleşik olanlar ve olmayanların patent başvuru sayıları)	OECD
CIP	Rekabetçi endüstriyel performans Endeksi	UNIDO

Tablo 1'de yer alan LCF ve FEV değişkenleri oran niteliğinde olduğundan, bu değişkenlere logaritmik dönüşüm uygulanmamıştır. CIP değişkeni için ise maksimum ve minimum değerler arasındaki farkın oldukça küçük olması nedeniyle logaritmik dönüşüm tercih edilmemiştir. INOVA değişkeni, patent başvuru sayısını adet olarak ifade ettiği için, esneklik yorumlarına olanak tanımak amacıyla logaritmik dönüşüme tabi tutulmuş ve ln sembolü ile gösterilmiştir. CIP değişkenine ilişkin veriler UNIDO veri tabanında yalnızca 1990–2021 yılları arasında mevcut olduğundan, çalışmanın başlangıç ve bitiş yılları bu zaman aralığına göre belirlenmiştir. FEV değişkeni $\frac{GDP}{Yenilenemeyen Enerji Tüketimi}$ formülü kullanılarak oluşturulmuştur (Alola vd. 2023: 4).

Grafik 3'te serilerin grafiksel görünümü incelendiğinde, dalgalı bir seyir izledikleri ve uzun dönem ortalamalarına geri dönmedikleri gözlemlenmektedir. Bu durum, görsel inceleme temelinde serilerin durağan olmayabileceğine işaret etmektedir. Ancak söz konusu yapının istatistiksel olarak doğrulanabilmesi için durağanlık testleriyle desteklenmesi önem arz etmektedir.

Grafik 3: Değişkenlerin Zaman Yolu Grafikleri



Tablo 2: Tanımlayıcı İstatistikler

	LCF	InNOVA	FEV	CIP
Ortalama	0.586840	7.882649	0.512180	0.108825
Medyan	0.577213	7.865006	0.505615	0.117653
Maksimum	0.821025	9.054271	0.589465	0.135714
Minimum	0.440642	6.729824	0.468502	0.071613
Standart Sapma	0.119758	0.754733	0.033087	0.020737
Çarpıklık	0.466843	0.139236	0.713713	-0.379710
Basıklık	2.029372	1.693583	2.366707	1.607763
Jarque-Bera	2.418516	2.379030	3.251477	3.353389
Olasılık	0.298419	0.304369	0.196766	0.186991
Gözlem Sayısı	32	32	32	32

Tablo 2’de, INOVA değişkeninin en yüksek ortalamaya (7.882649) sahip olduğu, bunu 0.586840 ortalamayla LCF değişkeninin izlediği gözlemlenmektedir. Ampirik bulgular, tüm serilerin basıklık değerlerinin 3’ten küçük olması nedeniyle negatif basıklığa (platykurtic dağılıma) sahip olduklarını ortaya koymaktadır. Ayrıca, tüm parametrelerin çarpıklık katsayılarının 1’den küçük olması, serilerin orta düzeyde çarpık bir dağılım sergilediğini düşündürmektedir. Jarque-Bera (JB) olasılık değerlerine göre, tüm serilerin normallik varsayımıyla uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Çalışmada ayrıca değişkenler, korelasyon ve çoklu doğrusallık testlerine tabi tutulmuş ve sonuçlar Tablo 3’te raporlanmıştır.

Tablo 3: Korelasyon Matrisi ve Varyans Enflasyon Faktörleri (VIF) Test Sonuçları.

	LCF	Korelasyon Matrisi			VIF Değerleri	
		INOVA	FEV	CIP	VIF	1/VIF
LCF	1.000000 ----				----	----
INOVA	-0.769085 (0.0000)	1.000000 ----			2.35	0.426129
FEV	0.602530 (0.0003)	0.699301 (0.0000)	1.000000 ----		2.03	0.493193
CIP	-0.938636 (0.0000)	0.622684 (0.0001)	0.539795 0.0014	1.000000 -----	1.69	0.590954
VIF ortalaması: 2.02						

Tablo 3 incelendiğinde, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde yüksek düzeyde korelasyona sahip olduğu gözlemlenmektedir. INOVA ve CIP değişkenleri ile LCF arasında negatif, FEV değişkeni ile ise pozitif yönde istatistiksel olarak anlamlı korelasyon tespit edilmiştir. INOVA ile FEV değişkenleri arasındaki korelasyon katsayısı yaklaşık %70 düzeyindedir ve bu oran oldukça yüksektir. Açıklayıcı değişkenler arasındaki korelasyon katsayılarının yüksek olması, iki bağımsız değişken arasında çoklu doğrusal bağlantı (multicollinearity) sorunu oluşabileceğine işaret etmektedir (Kennedy, 2008: 195–196). Bu nedenle, modelde çoklu doğrusal bağlantı olup olmadığını belirlemek amacıyla VIF (Variance Inflation Factor) değerleri Stata 18.5 yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Literatürde yaygın kabul gören yaklaşıma göre, çoklu doğrusal bağlantı probleminin bulunmadığını gösterebilmek için VIF değerlerinin 10'un altında olması beklenmektedir (Kennedy, 2008: 199). Çalışmada elde edilen en yüksek VIF değeri 2.35, ortalama VIF değeri ise 2.02 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, modelde yer alan açıklayıcı değişkenlerde çoklu doğrusal bağlantı sorununun bulunmadığını göstermektedir.

Modelde LCF bağımlı değişken, FEV, lnINOVA ve CIP değişkenleri bağımsız değişkenler olarak ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan model Eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$LCF_t = f(FEV_t, \ln INOVA_t, CIP_t) \quad (1)$$

Bu araştırmanın temel amacının CIP ve lnINOVA değişkenlerinin çevresel etkinliğini incelemek olduğu varsayılarak, Eşitlik (2)'deki ampirik model geliştirilmiştir:

$$LCF_t = \beta_0 + \beta_1 FEV_t + \beta_2 \ln INOVA_t + \beta_3 CIP_t + \epsilon_t \quad (2)$$

Eşitlik (2)'de t , 1990 – 2021 dönemdeki zaman boyutunu, β_0 parametresi sabit terimi, β_1 , β_2 ve β_3 parametreleri ise bağımsız değişkenlerin katsayılarını, ϵ_t hata terimini göstermektedir. Grafik 1'de CIP değişkeninin zaman içerisindeki değişimi incelendiğinde hem azalan hem de artan eğilimler sergilediği görülmektedir. Bu durum yatırımların öngörülemez doğası da göz önüne alındığında, CIP değişkeninin pozitif ve negatif şoklarının LCF üzerindeki etkilerini ayrı ayrı değerlendirmek daha faydalı olacaktır. Bu doğrultuda, Eşitlik (2)'deki ampirik modelde Eşitlik (3)'teki değişiklikler yapılmıştır:

$$LCF_t = \beta_0 + \beta_1 FEV_t + \beta_2 \ln INOVA_t + \beta_3 CIP_t^+ + \beta_4 CIP_t^- + \epsilon_t \quad (3)$$

Eşitlik (3)'te CIP_t^+ , CIP değişkeninin pozitif şoklarını temsil ederken, CIP_t^- , CIP değişkeninin negatif şoklarını temsil etmektedir. Eşitlik (3)'teki modelin analiz edebilmek, bazı bağımsız değişkenleri pozitif ve negatif şoklara ayırmaya izin veren NARDL yaklaşımı ile mümkündür.

4. Metodoloji

Bu bölümde çalışmada kullanılan ekonometrik yöntemlerin kısa bir açıklaması yapılacaktır. Çalışmada Shin vd. (2014) tarafından geliştirilen NARDL metodu tercih edilmiştir. NARDL yönteminin tercih edilmesinde küçük örneklemelerde de boyut ve güç özellikleri açısından daha iyi sonuçlar vermesi, farklı mertebeden durağan değişkenler arasındaki ilişkilerin incelenmesine izin vermesi etkili olmuştur. NARDL metodu uygulamak için bazı adımlar vardır.

İlk aşamada, zaman serisi verilerinin durağanlığını değerlendirmek için ADF ve Fourier-ADF (Enders & Lee, 2012) birim kök testleri uygulanmıştır. Fourier Augmented Dickey-Fuller (FADF) testinin tercih edilmesinde çalışmada kullanılan değişkenlerdeki her türlü yapısal değişikliği yakalayabilmek için trigonometrik terimleri kullanması, kukla değişken kullanmaya gerek kalmaması ve asimetrik ilişkileri modele dahil etmesi etkili olmuştur. Ayrıca bu testi Perron (1990), Zivot-Andrews (1992) ve Bai-Perron (2003) testlerinin yerine alternatif olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir (Christopoulos ve Leon-Ledesma, 2011: 9 – 10). Çalışmada değişkenlerin durağanlığı Augmented Dickey-Fuller (ADF) ve Fourier ADF birim kök testleri kullanılarak test edilmiştir (Dickey

ve Fuller, 1981; Enders ve Lee, 2012). ADF birim kök testi için regresyon denklemlerine LCF değişkenine göre uyarlanmış Eşitlik (4, 5, 6) da verilmiştir.

$$\Delta \ln LCF = \alpha LCF_{t-1} + \sum_{j=1}^g \theta_j LCF_{t-j} + u_t \quad (4)$$

$$\Delta LCF = \beta_1 + \alpha LCF_{t-1} + \sum_{j=1}^g \theta_j LCF_{t-j} + u_t \quad (5)$$

$$\Delta LCF = \beta_1 + \beta_2 t + \alpha LCF_{t-1} + \sum_{j=1}^g \theta_j LCF_{t-j} + u_t \quad (6)$$

Eşitlik (4, 5, 6)'daki denklemlerde β_1 terimi sabit terimi, $\beta_2 t$ zaman trendini ve u_t hata terimini temsil etmektedir. Gecikme uzunluğu g , SC veya AIC bilgi kriterleri kullanılarak otomatik olarak belirlenir. Eğer j 1 olarak bulunursa, değişkenin birinci farkının gecikmesi, otokorelasyon sorununu gidermek için modele eklenecektir. Burada LCF değişkeninde birim kökün varlığı α katsayısı kullanılarak test edilmektedir. Değişkenin bir gecikmesindeki t istatistik değerinin MacKinnon (1996) kritik değerlerinden büyük olduğunu durumda durağan olmayan değişken reddedilecektir. Başka bir ifade ile LCF değişkeni düzeyde durağan olacaktır. ADF birim kök testi yapısal kırılmalar altında güvenilir sonuçlar vermemektedir. Bu nedenle Enders ve Lee (2012) yaptıkları çalışmada ADF denkleminde Fourier terimlerini, özellikle sinüs ve kosinüs terimlerini ekleyerek, klasik ADF birim kök testinin yapısal kırılmalar altındaki performansını artırmayı amaçlamışlardır. Enders ve Lee (2012) çalışmasında önerilen Fourier ADF birim kök testi için regresyon modelleri Eşitlik (7, 8, 9)'da gösterilmiştir.

$$\Delta LCF = \alpha LCF_{t-1} + \phi_1 \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \phi_2 \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \sum_{j=1}^g \theta_j LCF_{t-j} + u_t \quad (7)$$

$$\Delta LCF = \beta_1 + \alpha LCF_{t-1} + \phi_1 \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \phi_2 \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \sum_{j=1}^g \theta_j LCF_{t-j} + u_t \quad (8)$$

$$\Delta LCF = \beta_1 + \beta_2 t + \alpha LCF_{t-1} + \phi_1 \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \phi_2 \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \sum_{j=1}^g \theta_j LCF_{t-j} + u_t \quad (9)$$

Eşitlik (7, 8, 9)'teki denklemlerdeki Fourier terimlerinde k frekansı, t trendi, $\pi = 3.1415$ ve T gözlem sayısını temsil etmektedir. Optimal frekans k , 1'den 5'e kadar test edilmiştir. Önemli olan sinüs ve kosinüs terimlerinin istatistiksel olarak anlamlı bulunmasıdır. ϕ_1 ve ϕ_2 'nin anlamsız olması değişkenin yapısal kırılmanın olmadığı ve klasik ADF modelinin sonuçlarının geçerli olacağı anlamına gelir. Öte yandan sinüs ve kosinüs terimleri istatistiksel olarak anlamlı ise ve α test istatistiği Enders ve Lee (2012) tarafından sağlanan kritik değerlerden büyük bulunursa sıfır hipotezi reddedilecek ve seri FADF testine göre düzeyde durağan kabul edilecektir.

İkinci aşamada, Fourier-NARDL yöntemini kullanarak seriler arasındaki eş-bütünleşme ilişkisi tahmin edilmiştir. Eş-bütünleşme ilişkisini ortaya koymak için sınır testi yapılmıştır. Sınır testi sonucunda hesaplanan "t-Bounds Test" değeri $I(0)$ ve $I(1)$ sınır değerleriyle karşılaştırılır. t-Bounds Test" değerinin üst sınır olan $I(1)$ değerinden büyük çıkması, modelin farklı anlamlılık seviyelerinde asimetrik olarak eş-bütünleşik olduğunu göstermektedir. Daha sonra Wald test sonucu incelenerek

bazı spesifikasyon testleri araştırılmıştır. Eşitlik (3), Fourier terimlerini de dikkate alarak, hata düzeltme formu çerçevesinde Eşitlik (10)'da yeniden düzenlenmiştir:

$$\Delta LCF = \beta_0 + \beta_1 \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \beta_2 \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \beta_3 LCF_{t-1} + \beta_4 FEV_{t-1} + \beta_5 \ln INOVA_{t-1} + \beta_6 CIP_{t-1}^+ + \beta_7 CIP_{t-1}^- + \beta_8 \sum_{i=1}^a \Delta LCF_{t-1} + \beta_9 \sum_{i=0}^b \Delta FEV_{t-1} + \beta_{10} \sum_{i=0}^c \Delta \ln INOVA_{t-1} + \beta_{11} \sum_{i=0}^d \Delta CIP_{t-1}^- + \beta_{12} \sum_{i=0}^e \Delta CIP_{t-1}^+ + \epsilon_t \quad (10)$$

Eşitlik (10)'da β_0 : sabit terimi, ϵ_t : hata terimini, β_1 ve β_2 Fourier terimlerinin katsayılarını, k : uygun frekansı, t : trendi, T : gözlem sayısını ifade etmektedir. Ayrıca β_4 'ten β_7 'e kadar olan katsayılar uzun dönem katsayıları, β_8 'ten β_{12} 'e kadar olan katsayılar ise kısa dönem katsayıları göstermektedir. Eşitlik (10)'daki denkleme Fourier terimleri eklenerek kukla değişkenlere gerek kalmadan yapısal kırılmalar ve asimetrik ilişkiler modele dahil edilmiştir.

5. Ampirik Bulgular

Zaman serisi analizinde verilerin durağanlık düzeyinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. İlk olarak çalışmada kullanılan değişkenlerin durağanlığı ADF ve Fourier ADF ile gözden geçirilmiş ve sonuçlar Tablo 4'te raporlanmıştır.

Tablo 4: Fourier ADF Test Sonuçları

Değişken	k	Sabitli Model			
		Wald F***	p****	Kesirli FADF test İstatistiği	Kritik Değer**
LCF	0.10	4.573187	1	-3.337724	-3.88278
FEV	0.30	9.37869*	3	-3.887887	-3.91843
lnINNOVA	3.40	2.411011	1	-0.933015	-3.02004
CIP	0.70	6.233698	1	-3.469067	-3.94238
Değişken	k	Sabitli ve Trendli Model			
		Wald F***	p****	Kesirli FADF test İstatistiği	Kritik Değer**
LCF	0.10	2.167633	2	-2.645040	-4.26469
FEV	4.50	4.030942	2	-1.923930	-3.58208
lnINNOVA	3.70	1.679431	1	-1.855183	-3.66383
CIP	1.00	6.824768	1	-3.540392	-4.34382

Not: * İstatistiki olarak %5 anlamlı olduğunu ifade etmektedir.

** FADF testinin kritik değerleri Bozoklu vd. (2020) çalışmasındaki A ve B tablolarından elde edilmiştir.

***Wald F testinin kritik değerleri Enders ve Lee (2012) çalışmasının 197. sayfasından elde edilmiştir. İstatistiki olarak %5 anlamlılık seviyesi esas alınarak kritik değerler sabitli ve sabitli – trendli model sırasıyla 7.58 ve 9.14 olarak belirlenmiştir.

****En ideal gecikme sayısı (p) Akaike Bilgi Kriteri (AIC) dikkate alınarak belirlenmiştir.

Tablo 4, trigonometrik terimlerin anlamlılığını değerlendiren F kısıt testinin sonuçlarını göstermektedir. Bulgular, bu terimlerin sabit modelde FEV değişkeni anlamlı olduğunu göstermektedir. FADF test istatistik değerleri sabitli, sabitli ve trendli modelde kritik değerlerden küçüktür. Bu sonuçlara dayanarak, değişkenlerin durağan olmadığı sonucuna varılmıştır. Durağan olmayan serileri için Augmented Dickey-Fuller (ADF) birim kök testi yapılmıştır. Bu değişkenler için ADF testinin sonuçları Tablo 5'te raporlanmıştır.

Tablo 5: ADF Birim Kök Test Sonuçları

Değişken	Sabitli Model		
	Test İstatistik Değeri	Kritik Değer (%5)	p**
LCF	-2.409739	-2.967767	7
FEV	-0.437644	-2.960411	7
lnINNOVA	-0.371530	-2.976263	7
CIP	-1.880033	-2.960411	7
ΔLCF^*	-8.608967	-2.963972	7
ΔFEV^*	-5.623190	-2.963972	7
$\Delta \ln INNOVA^*$	-4.225482	-2.963972	7
ΔCIP^*	-4.416585	-2.963972	7

Tablo 5 (Devamı): ADF Birim Kök Test Sonuçları

Sabitli ve Trendli Model			
Değişken	Test İstatistik Değeri	Kritik Değer (%5)	p**
LCF	-0.568349	-3.603202	7
FEV	-2.307988	-3.562882	7
lnINNOVA	-1.911820	-3.562882	7
CIP	-0.539461	-3.562882	7
Δ LCF*	-8.748725	-3.568379	7
Δ FEV*	-5.943356	-3.568379	7
Δ lnINNOVA*	-4.161042	-3.568379	7
Δ CIP*	-4.817503	-3.568379	7

Not: *%5 anlamlılık seviyesinde durağan olduğunu ifade etmektedir.

** En ideal gecikme (p) AIC ile tespit edilmiştir.

Tablo 5 incelendiğinde hem sabitli model de hem de sabitli ve trendli modelde LCF, FEV, lnINNOVA ve CIP değişkenleri birinci farkında durağandılar. Değişkenlerden hiçbirinin ikinci farkta durağanlaşmadığı ve maksimum birinci farkta durağanlaştığı tespit edilmiştir. Bu tespit yapıldıktan sonra, farklı düzeylerde durağan olan seriler arasındaki eş bütünleşme ilişkisini araştırmaya imkân sağlayan ve literatürde doğrusal olmayan ARDL (NARDL) olarak bilinen sınır testi kullanılmıştır. Ayrıca yapısal değişimleri dikkate almak hem de daha güçlü hale getirmek için NARDL modeline trigonometrik terimler eklenmiştir. Çalışmada, veri setinde eş bütünleşmenin varlığını incelemek için Kesirli Fourier NARDL sınır testi kullanılmıştır. Analizin sonuçları Tablo 6'da raporlanmıştır.

Tablo 6: Fourier NARDL Eş Bütünleşme Testi Sonuçları

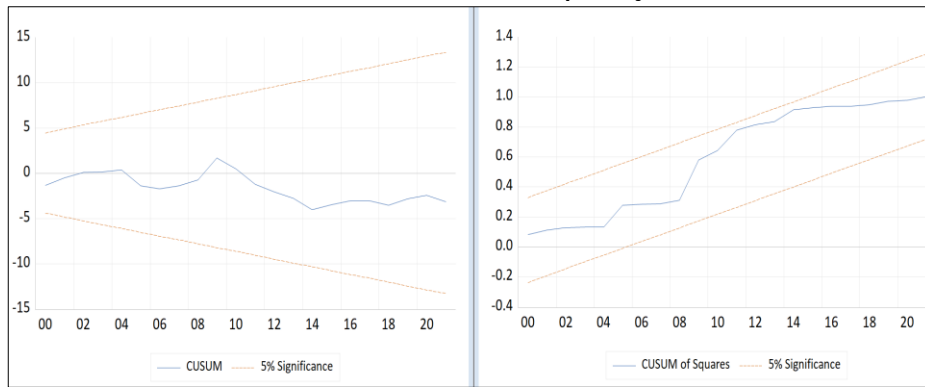
Model	F-istatistik	Üst Sınır Kritik Değerler		
		%1	%5	%10
LCF = f (FEV, lnINNOVA, CIP+, CIP-)	10.66812	4.37	3.49	3.09
Asimetrik Wald testi	WLR= 4.949559 (0.0358)			
AIC Bilgi Kriterine Göre Gecikmeler	1, 0, 0, 0, 0			
Tanı Testleri		İstatistik	Olasılık	
Heteroskedastisite Testi: (Breusch-Pagan-Godfrey)		6.274429	0.508100	
Normallik testi: (Jarque-Bera)		0.432822	0.805404	
Seri Korelasyon testi: (Breusch-Godfrey LM Test)		10.53876	0.105100	
Ramsey-Reset		1.640545	0.213600	
Cusum ve Cusumsq		İstikrarlı (Grafik 4)		
R2 ve Düzeltilmiş R2		0.963219, 0.952025		

Tablo 6'daki bulgulara göre, hesaplanan F istatistik değeri üst sınır kritik değerlerden büyük %1 anlamlılık düzeyinde büyük çıkmıştır. Bu sonuç, FEV, lnINNOVA, CIP+, CIP- ve LCF arasındaki uzun vadeli ilişkiyi doğrulamakta, değişkenler arasında eşbütünleşme ilişkisi olduğunu ortaya koymaktadır. CIP'in LCF üzerindeki asimetrik etkilerinin geçerliliği Asimetrik Wald test istatistiği ile sınanmıştır. Wald testi sonuçlarına göre olasılık değeri (0.0358) %5 anlamlılık seviyesinde istatistiki olarak anlamlıdır. Ayrıca tahmin edilen model sonucunda elde edilen bulguların sağlamlılığını kontrol etmek için tanısız testler yapılmıştır. "Breusch-Godfrey Serial Correlation LM" testi ile otokorelasyon problemi olmadığı, Jarque-Bera testi ile normallik dağılımının sağlandığı, "Breusch-Pagan-Godfrey" testi ile değişen varyans sorununun olmadığı, Ramsey RESET testi ile modelde göz ardı edilmiş değişkenin olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, CUSUM ve CUSUMsq testlerinin Grafik 4'teki grafiği %95 güven aralığında, istenilen sınırlar içerisinde olması kurulan modelin istikrarlı olduğunu göstermektedir.

Tanı test koşulları sağlandıktan sonra uzun ve kısa dönem katsayıları yorumlanabilir. Tablo 6, Fourier terimleriyle NARDL'nin uzun ve kısa dönem sonuçlarını sunmaktadır. Tablo 6'da Panel A'daki veriler incelendiğinde, tüm değişkenlerin uzun dönemde olduğu görülmektedir. Hem uzun dönemli sonuçlar analiz edildiğinde, FEV değişkeninin LCF ile pozitif korelasyonlu olduğu ve çevre kalitesini olumlu etkilediği görülmektedir. Tam aksine INNOVA değişkeni ise LCF ile negatif

korelasyonludur. Çalışmanın diğer bir değişkeni olan CIP değişkeninin pozitif ve negatif şokları LCF değişkenini negatif etkilemektedir. CIP değişkeninin pozitif şoklarının çevre kalitesini bozucu etkisi, CIP değişkeninin negatif şoklarının bozucu etkisinden daha fazladır. Ayrıca, kısa vadeli parametrelerle ilgili olarak, Fourier terimlerinin katsayıları istatistiksel olarak anlamlı, cos ve sin terimlerinin negatif olduğu tespit edilmiştir. Tablo 7 Panel B'deki veriler incelendiğinde, Hata Düzeltme katsayısı (ECT) istatistiksel olarak anlamlı ve negatif işaretli olduğunu göstermektedir. ECT -1'den küçük ve -2'den büyük ise dengeye doğru sönümlü dalgalanmaların olduğunu ifade eder (Narayan ve Smyth, 2006: 339). Tablo7, Panel B'de ECT 'nin -1.237116 olması, hata düzeltme sürecinin doğrudan denge yoluna monoton bir şekilde yaklaşmak yerine, uzun dönem değerinin etrafında sönümlü bir şekilde dalgalandığını ima eder. Ancak, bu süreç tamamlandığında, denge yoluna yakınsama hızlı bir şekilde gerçekleşir.

Grafik 4: Cusum ve Cusumsq Sonuçları



Tablo 7: Uzun Dönemli ve Kısa Dönemli Sonuçları

Panel A: Uzun Dönem Sonuçları				
Değişkenler	Katsayılar	Standart Hatalar	T istatistik	Olasılık
FEV	0.571982	0.228512	2.503070	0.0199
lnINNOVA	-0.026833	0.012498	-2.146973	0.0426
CIP+	-5.140549	0.487173	-10.55179	0.0000
CIP-	-2.582355	0.700372	-3.687117	0.0012
Panel B: Kısa Dönem Sonuçları				
COS	0.015866	0.006223	2.549622	0.0179
SIN	-0.028962	0.006518	-4.443394	0.0002
ECT(-1)	-1.237116	0.140144	-8.827437	0.0000

6. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, öncelikle çalışmanın amacına uygun olarak yenilenemez enerji verimliliği ile çevresel kalite arasındaki ilişki ortaya koyulmuştur. Enerji tüketimi ekonomik büyümenin sağlanmasında çok önemli bir rol oynamaktadır, ancak enerji tüketimini azaltmaya yönelik çabaların bazen büyümeyi engelleyebileceğini kabul etmek önemlidir. Bu bağlamda, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler, ekonomik kalkınmayı gerçekleştirmek ile çevresel kaliteyi artırmak arasında bir denge kurmaya odaklanmaktadır. Bu dengeyi sağlamak için en etkili stratejilerden biri enerji verimliliğini artırmak ve enerji israfını en aza indirmektir. Analiz sonuçları FEV'in LCF üzerinde pozitif bir etkisi olduğunu göstermektedir. Diğer bir ifade ile yenilenemez enerji verimliliğindeki artış çevresel kaliteyi artırmaktadır. Literatürde Tajudeen vd. (2018) 30 OECD ülkesi için, Akram vd. (2020) gelişmekte olan 66 ülke için, Fakher vd. (2023) BRICS ülkeleri için, Chen vd. (2024) enerji verimliliği en yüksek 10 ülke için, Jahanger vd. (2023) 29 Avrupa ülkesi için, Zhou vd. (2023) Çin için, Kazemzadeh vd. (2022) 16 gelişmekte olan ülke için yapmış oldukları çalışmalarda benzer sonuçlara ulaşmıştır. Türkiye özelinde yenilenemez enerji verimliliğinin çevresel kalite üzerindeki etkisini LCF bağlamında ele alan bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Ampirik analizden elde edilen bulgulardan biri de Türkiye için INOVA'daki artışın uzun dönemde LCF'yi azaltmasıdır. Aslında, bir ülkede inovasyonun artması çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesine yol açarak çevre kalitesini artırması beklenir. Bu doğrultuda Özkan vd. (2023), Yurdakul ve Kazan (2020), Xu vd. (2022) yapmış oldukları çalışmalarda INOVA'nın çevre kalitesi üzerindeki olumlu etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Türkiye'de ise INOVA değişkeninin çevre kalitesini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Bu tespitin nedenlerini ortaya koyabilmek ve çevresel kalite ile inovasyon arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılabilmesini sağlamak için ekonomik büyüme ile çevresel kalite arasındaki ilişkiyi uzun dönemde incelemeye imkân veren Yük Kapasitesi Eğrisi (LCC)'den yararlanılabilir. Türkiye için, Dam ve Sarkodie (2023), Afshan ve Yagoob (2023), Güneysu (2023), İçen (2024), Çağlar vd. (2024) çalışmalarında LCC hipotezinin geçerli olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu bağlamda Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler kalkınmanın ilk dönemlerinde, Ar-Ge faaliyetleri için ayrılan bütçelerin sınırlı olması, beşerî sermaye yetersizliği ve inovasyon faaliyetlerinin planlı bir şekilde yürütülememesi gibi konular nedeniyle çevresel kaliteyi artırmak yerine ekonomik büyümeye öncelik verirler (Yiğit, 2014, s. 252). Bu dönemde yeni teknolojilerin geliştirilmesi, daha fazla üretime, tüketime neden olması daha fazla atık üretimine yol açması çevre kirliliğini artırabilir. Örneğin seyahat ve ulaşım alanlarında inovasyonların giderek daha fazla benimsenmesi ve akıllı teknolojilerin araçlara dahil edilmesi, çeşitli ekonomik sektörlerde teknolojik araçların kullanılabilirliğinin artması birçok malzeme kullanılmasına ve bu malzemelerin üretim süreçleri zararlı etkilere sahip olmasına bağlı olarak çevresel kaliteyi düşürebilmektedir (Shabani & Shahnazi, 2019:1065). Nitekim Türkiye'de 1960'lı yıllardan itibaren inovasyonların sürekli artmasına rağmen LCF'nin sürekli azalması ve özellikle 1980 yılından itibaren biyolojik kapasitenin ekolojik ayak izinin altına düşmesi bu durumun bir nedeni olarak gösterilebilir. Eğer milli gelir düzeyi artmaya devam eder ve belli bir dönüm noktasından sonra ise çevresel kalite öncelikli hale gelir ve LCF artar. Ulaşılan bulgular literatürde Adebayo, vd. (2022) Şili için, Cheng ve Yao (2021) Çin için, Qoyash ve Eren (2022) Türkiye için benzer bulgulara ulaşmışlar.

Rekabetçi Endüstriyel Performans Endeksi (CIP), herhangi bir ülkedeki sanayi sektörünün performansını ve rekabet gücünü uluslararası düzeyde analiz etmek amacıyla kullanılan bir göstergedir. Endeksin değeri bire yaklaştıkça, ülkenin sanayi sektöründeki rekabet gücünün arttığı kabul edilmektedir. Sanayi sektöründe rekabetin artması, işletmelerin maliyetleri azaltmak ve üretkenliği artırmak için daha fazla kaynak kullanmasına yol açabilmektedir. Bu durum, çevre kalitesinde bozulmalara neden olabilmektedir. Öte yandan, CIP'in yenilikçiliğe dayalı yönü, Ar-Ge yatırımlarını teşvik ederek çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesine olanak tanımakta ve çevresel kalite üzerinde olumlu etkiler yaratabilmektedir. Türkiye'de elde edilen bulgular, CIP değişkenine yönelik pozitif ve negatif şokların, çevresel kalitenin göstergesi olan LCF değerini düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Bu sonucun altında yatan nedenler, CIP endeksini oluşturan bileşenler dikkate alınarak açıklanabilir. UNIDO verilerine göre, Türkiye imalat ihracatında 42. sırada yer alırken, orta ve yüksek teknolojiye dayalı imalat faaliyetlerinde 61. sıradadır. Ülke, GSYH'ye oranla imalat katma değerinde 14. sırada yer almasına rağmen, toplam imalat katma değeri içinde orta ve yüksek teknoloji faaliyetleri bakımından 45. sırada yer almaktadır. Bu durum, Türkiye'de üretim yapısının büyük ölçüde düşük teknolojiye dayandığını göstermektedir. Uzun vadeli sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi için imalatla yüksek teknoloji faaliyetlerinin artırılması önem arz etmektedir. Literatürde, Rasheed vd. (2024) gelişmekte olan yedi Asya ülkesi; Çağlar ve Aşkın (2023) ilk 10 CIP ekonomisi; Yuhuan vd. (2024) yüksek gelirli ülkeler; Çağlar vd. (2024a) ise Türkiye örneği için benzer sonuçlar rapor etmiştir.

7. Sonuç

Sanayi üretimindeki artış, inovasyon faaliyetleri ve enerji kullanımı, ekonomik kalkınma süreçlerinin temel dinamikleri arasında yer almakla birlikte, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli riskler de barındırmaktadır. Bu bağlamda ülkelerin ekolojik dengelerini koruyup koruyamadıkları, giderek daha fazla akademik ve politik ilginin odağında yer almaktadır. Literatürde bu ilişkileri değerlendirmek üzere kullanılan yük kapasitesi faktörü (LCF), çevresel sürdürülebilirliğin kapsamlı bir göstergesi olarak öne çıkmaktadır. Ancak LCF üzerindeki etkilerin zamansal ve yapısal

farklılıklar gösterdiği, özellikle endüstriyel performansın çevresel etkilerinin simetrik olmayabileceği yönünde bulgular giderek artmaktadır. Türkiye özelinde yapılan çalışmalar çoğunlukla doğrusallık varsayımına dayalı olup, endüstriyel performansın pozitif ve negatif yönlü değişimlerinin çevre üzerindeki farklı etkilerini dikkate almamaktadır. Bu çalışma, tam da bu boşluğu doldurmayı amaçlamakta ve yenilenemez enerji verimliliği, inovasyon ve endüstriyel performansın LCF üzerindeki asimetrik etkilerini ele alarak literatüre hem yöntemsel hem de uygulamalı düzeyde katkı sağlamaktadır.

Çalışmada ulaşılan bulgulara göre, fosil kaynaklarına dayanan yenilenemeyen enerji verimliliğinin uzun dönemde çevresel kaliteyi artırdığı gözlemlenmiştir. Yenilenemeyen enerji verimliliğinin %1 artması çevresel kaliteyi (Yük Kapasitesi Faktörü, LCF) %1.57 artırmaktadır. Ekonomik büyümenin itici gücü olan enerji tüketiminin yoğun şekilde çevreyi kirleten fosil kaynaklara dayalı olması ve enerji verimliliğini artıran (daha fazla üretimi daha az enerji kullanarak üretmek) uygulamalar yenilenemeyen enerji kullanımının çevre üzerindeki olumsuz etkisini azaltmaktadır. Yerleşik ve yerleşik olmayanların patent başvuru sayısının ölçüt olarak ele alındığı inovasyondaki artışlar yaygın literatürün aksine Türkiye de çevresel kaliteyi azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. İnovasyondaki %1 artış LCF değişkenini %0.03 azaltmaktadır. Bu sonuç, Türkiye’de gelişmenin ilk aşamalarından itibaren çevresel kaliteyi artırmak yerine ekonomik büyümeye öncelik verilmesinden ve kişi başına düşen milli gelir düzeyinin belli bir seviyeye ulaşamaması nedeniyle yeterince çevre bilincinin oluşmamasından kaynaklanmaktadır. Bir ülkenin sanayileşme yoğunluğunu ve küresel pazar üzerindeki etkisini ölçen CIP değişkenindeki dalgalanmalar çevresel kaliteyi etkilemektedir. CIP değişkenindeki pozitif şoklar (ekonomide işler yolunda gittiği dönemlerde) LCF’yi %5.14 azaltarak çevresel kaliteyi kötüleştirmektedir. CIP değişkenindeki negatif şoklar da (ekonomide işlerin yolunda gitmediği dönemlerde) benzer şekilde LCF’yi %2.58 azaltarak çevresel kaliteyi kötüleştirmektedir. Bu durum Türkiye de CIP değişkenindeki pozitif şoklar gibi negatif şoklarında çevresel kaliteyi düşürdüğünü göstermektedir.

Bu çalışmanın ampirik bulguları, ülkeyi yönlendirmek isteyen politika yapıcıları için kaynak teşkil edebilir. Çalışma, verileri analiz ederek karar alma süreçlerini geliştirmeyi amaçlayan bazı öneriler sunmaktadır.

- I) Bulgular, yenilenemeyen enerji kaynaklarının verimliliğinin artırılmasının çevresel sürdürülebilirlik ve kalitenin desteklenmesinde kilit öneme sahip olduğunu göstermektedir. Politika yapıcılar, hane halkları, işletmeler ve endüstriler için farkındalık kampanyaları ve eğitim programları yoluyla bu kaynakların daha iyi kullanılmasını teşvik eden stratejiler geliştirmelidir. Bu grupları enerjiyi akıllıca kullanmalarını sağlayacak araçlarla donatarak çevre kalitesi artırılabilir ve daha sağlıklı bir dünya desteklenebilir.
- II) Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerdeki teknolojik yeniliklerin ekonomik büyümeyi hedeflediği ve bu büyümenin çevre kalitesinin kötüleşmesi pahasına elde edildiği söylenebilir. Bu yenilikler ekonomiyi canlandırırken, sürdürülebilir kalkınmayı da tehdit edebilir. Bu tehditleri ortadan kaldırmak için mevcut çevre politikalarını yeniden planlamak önemlidir. Politika yapıcılar daha katı emisyon düzenlemeleri benimseyen, daha temiz teknolojileri teşvik eden ve yenilenebilir enerjiye yatırım yapan planlar geliştirmelidir. Bu şekilde bu ülkeler bir yandan ekonomik olarak büyürken bir yandan da gelecek için çevreyi koruyabilirler.
- III) Bulgular, rekabet avantajlarını benimsemenin çevreyi kötüleştirdiğini göstermektedir. Dolayısıyla, endüstriyel rekabet avantajını tehlikeye atmadan çevresel kaliteyi artırmak için temel ilkeleri ortaya koyan politikalar, Türkiye için birincil hedef olmalıdır. Bu hedefi gerçekleştirmek için Türkiye nükleer enerji başta olmak üzere yenilenebilir enerjiye daha fazla yatırım yapmalıdır. Bu yatırımlar, temiz enerjiye yönelik artan talebi karşılamak ve ekonomiye ve çevreye zarar veren ithal fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için gereklidir. Türkiye bu enerji kaynaklarına odaklanarak, enerji ithalatından gelen fonları yeşil

ekonomik stratejiler geliştirmeye yönlendirebilir, sürdürülebilir büyümeyi ve gelecek nesiller için daha sağlıklı bir çevreyi teşvik edebilir.

Bu önerilerin uygulanması, politika yapıcılarını sürdürülebilir kalkınmayı ekonomik büyümenin önüne koymasına neden olabilir. Bu politika düzeyindeki dönüşümler, Türkiye'nin SDG 4 (kaliteli eğitim), SDG 7 (Uygun fiyatlı ve temiz enerji), SDG 8 (İnsana yakışır iş ve ekonomik büyüme), SDG 9 (sanayi, yenilikçilik ve altyapı), SDG 12 (Sürdürülebilir üretim ve tüketim kalıplarını sağlamak) ve SDG 13 (iklim eylemi) hedefleri başta olmak üzere diğer hedefleri ulaşmalarına yardımcı olabilir.

Son olarak, bu makalenin bazı sınırlamaları vardır ve ileride yapılacak çalışmalar için öneriler sunmaktadır. Bu çalışma sadece endüstriyel rekabet gücüne, inovasyona ve yenilenemeyen enerji verimliliğine odaklanmaktadır ve Türkiye'yi ele almaktadır. Gelecekte yapılacak makalelerde, farklı ülkeler veya ülke grupları için endüstriyel faaliyetlerinin, inovasyonun ve yenilenemeyen enerji verimliliğinin simetrik ve asimetrik etkileri araştırılabilir. Ayrıca sürdürülebilir bir çevrenin daha kapsamlı bir göstergesi olan yük kapasitesi faktörünün veya ekolojik ayak izinin bağımlı değişken olarak analize dahil edilmesiyle de karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilebilir.

Kaynakça

- Abbas, S., Gui, P., Chen, A., & Ali, N. (2022). The Effect of Renewable Energy Development, Market Regulation, and Environmental Innovation on CO2 Emissions in BRICS Countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 59483-59501.
- Adebayo, T. S., Oladipupo, S. D., Adeshola, I., & Rjoub, H. (2022). Wavelet Analysis of Impact of Renewable Energy Consumption and Technological Innovation on CO2 Emissions: Evidence from Portugal. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(16), 23887-23904.
- Adebayo, T. S., Udemba, E. N., Ahmed, Z., & Kirikkaleli, D. (2021). Determinants of Consumption-based Carbon Emissions in Chile: an Application of Non-linear ARDL. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43908-43922.
- Adedoyin, F. F., Alola, A. A., & Bekun, F. V. (2020). An Assessment of Environmental Sustainability Corridor: The Role Of Economic Expansion and Research and Development in EU Countries. *Science of the total environment*, 713, 136726.
- Afshan, S., & Yaqoob, T. (2023). Unravelling the Efficacy of Green Innovation and Taxation in Promoting Environmental Quality: A Dual-model Assessment of Testing the LCC Theory in Emerging Economies. *Journal of Cleaner Production*, 416, 137850.
- Akram, R., Chen, F., Khalid, F., Ye, Z., & Majeed, M. T. (2020). Heterogeneous Effects of Energy Efficiency and Renewable Energy on Carbon Emissions: Evidence from Developing Countries. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119122.
- Alam, M. S., Apergis, N., Paramati, S. R., & Fang, J. (2021). The Impacts of R&D Investment and Stock Markets on Clean-energy Consumption and CO2 Emissions in OECD Economies. *International Journal of Finance & Economics*, 26(4), 4979-4992.
- Alola, A. A., Özkan, O., & Usman, O. (2023). Role of Non-Renewable Energy Efficiency and Renewable Energy in Driving Environmental Sustainability in India: Evidence from the Load Capacity Factor Hypothesis. *Energies*, 16(6), 2847.
- Alvarez-Herranz, A., Balsobre-Lorente, D., Shahbaz, M., & Cantos, J. M. (2017). Energy Innovation and Renewable Energy Consumption in the Correction of Air Pollution Levels. *Energy Policy*, 105, 386-397.
- Ang, J. B. (2009). CO2 Emissions, Research and Technology Transfer in China. *Ecological Economics*, 68(10), 2658-2665.

- Bai, J. ve Perron, P. (2003), Computation and Analysis of Multiple Structural Change Models, *Journal of Applied Econometrics*, Vol. 18, pp. 1–22.
- Bozoklu, S., Yılandı, V., & Görüş, M. S. (2020). Persistence in Per Capita Energy Consumption: a Fractional Integration Approach with a Fourier Function. *Energy Economics*, 91, 104926. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104926>.
- Charfeddine, L., & Umlai, M. (2023). ICT Sector, Digitization and Environmental Sustainability: A Systematic Review of the Literature from 2000 to 2022. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 184, 113482.
- Chen, W., Alharthi, M., Zhang, J., & Khan, I. (2024). The Need for Energy Efficiency and Economic Prosperity in a Sustainable Environment. *Gondwana Research*, 127, 22-35.
- Cheng, Y., & Yao, X. (2021). Carbon Intensity Reduction Assessment of Renewable Energy Technology Innovation in China: A Panel Data Model With Cross-section Dependence and Slope Heterogeneity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110157.
- Cho, J. H., & Sohn, S. Y. (2018). A Novel Decomposition Analysis of Green Patent Applications for the Evaluation of R&D Efforts to Reduce CO₂ Emissions from Fossil Fuel Energy Consumption. *Journal of Cleaner Production*, 193, 290-299.
- Christopoulos, D. K., & Leon-Ledesma, M. A. (2011). International Output Convergence, Breaks, and Asymmetric Adjustment. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, 15(3).
- Çağlar, A. E., & Askin, B. E. (2023). A Path Towards Green Revolution: How do Competitive Industrial Performance and Renewable Energy Consumption Influence Environmental Quality Indicators?. *Renewable Energy*, 205, 273-280.
- Çağlar, A. E., & Yavuz, E. (2023). The Role of Environmental Protection Expenditures and Renewable Energy Consumption in the Context of Ecological Challenges: Insights from the European Union with the Novel Panel Econometric Approach. *Journal of Environmental Management*, 331, 117317.
- Çağlar, A. E., Avci, S. B., Gökçe, N., & Destek, M. A. (2024a). A Sustainable Study of Competitive Industrial Performance Amidst Environmental Quality: New Insight from Novel Fourier Perspective. *Journal of Environmental Management*, 366, 121843.
- Çağlar, A. E., Daştan, M., & Rej, S. (2024). A new Look at China's Environmental Quality: how does Environmental Sustainability Respond to the Asymmetrical Behavior of the Competitive Industrial Sector?. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 31(1), 16-28.
- Dam, M. M., & Sarkodie, S. A. (2023). Renewable Energy Consumption, Real Income, Trade Openness, and Inverted Load Capacity Factor Nexus in Türkiye: Revisiting the EKC Hypothesis with Environmental Sustainability. *Sustainable Horizons*, 8, 100063.
- Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1981). Likelihood Ratio Statistics for Autoregressive Time Series with a Unit root. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, 1057-1072.
- Dogan, E., & Pata, U. K. (2022). The impact of ICT, Innovation, and Renewable Energy Consumption on Environmental Sustainability: Evidence from G7 Countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(7), 10320–10332. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135038>
- Dünya Bankası (2022). Dünya kalkınma göstergeleri. Erişim adresi: <http://datatopics.worldbank.org/world-development-indicators/> (Erişim Tarihi 01.12.2024)

- Ehigiamusoe, K. U., & Dogan, E. (2022). The Role of Interaction Effect Between Renewable Energy Consumption and Real Income in Carbon Emissions: Evidence from Low-Income Countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111883.
- Enders, W., & Lee, J. (2012). The Flexible Fourier Form and Dickey–Fuller Type Unit Root Tests. *Economics Letters*, 117(1), 196-199.
- Fakher, H. A., Ahmed, Z., Acheampong, A. O., & Nathaniel, S. P. (2023). Renewable Energy, Nonrenewable Energy, and Environmental Quality nexus: An Investigation of the N-Shaped Environmental Kuznets Curve Based on Six Environmental indicators. *Energy*, 263, 125660.
- Fernández, Y. F., López, M. F., & Blanco, B. O. (2018). Innovation for Sustainability: the Impact of R&D Spending on CO2 Emissions. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3459-3467.
- Ganda, F. (2019). The Impact of Innovation and Technology Investments on Carbon Emissions in Selected Organisation for Economic Co-operation and Development Countries. *Journal of Cleaner Production*, 217, 469-483.
- Global Footprint Network. (n. d.). National Footprint & Biocapacity Explorer: Country Trends (biocapacity and ecological footprint per capita) [Web data tool]. Retrieved June 23, 2025, from <https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?cn=223&type=BCpc,EFCpc>
- Görmüş, S., & Aydın, M. (2020). Revisiting the environmental Kuznets Curve Hypothesis Using Innovation: New Evidence from the Top 10 Innovative Economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 27904-27913.
- 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>
- Güloğlu, B., Çağlar, A. E., & Pata, U. K. (2023). Analyzing the Determinants of the Load Capacity Factor in OECD Countries: Evidence from Advanced Quantile Panel Data Methods. *Gondwana Research*, 118, 92-104.
- Güneysu, Y. (2023). Türkiye’de Finansal Gelişme, Küreselleşme ve Sanayileşmenin Yük Kapasite Faktörü Üzerindeki Etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 14(3), 934-946.
- Hanif, I., Raza, S. M. F., Gago-de-Santos, P., & Abbas, Q. (2019). Fossil Fuels, Foreign Direct Investment, and Economic Growth have Triggered CO2 Emissions in Emerging Asian Economies: Some Empirical Evidence. *Energy*, 171, 493-501.
- He, Y., Fu, F., & Liao, N. (2021). Exploring the Path of Carbon Emissions Reduction in China’s Industrial Sector Through Energy Efficiency Enhancement Induced by R&D Investment. *Energy*, 225, 120208.
- İçen, N. M. E. (2024) Türkiye’de Yük Kapasite Faktörünün Belirleyicileri Nelerdir? Genişletilmiş ARDL Yaklaşımı. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 20(2), 299-312.
- Jahanger, A., Chishti, M. Z., Onwe, J. C., & Awan, A. (2022). How far Renewable Energy and Globalization are Useful to Mitigate the Environment in Mexico? Application of QARDL and Spectral Causality Analysis. *Renewable Energy*, 201, 514-525.
- Kazemzadeh, E., Fuinhas, J. A., Koengkan, M., Osmani, F., & Silva, N. (2022). Do Energy Efficiency and Export Quality Affect the Ecological Footprint in Emerging Countries? A Two-Step Approach Using the SBM–DEA Model and Panel Quantile Regression. *Environment Systems and Decisions*, 42(4), 608-625.
- Kennedy, P. (2008). *A Guide to Econometrics*. Cambridge: MIT Press.

- Khan, Z., Ali, M., Kirikkaleli, D., Wahab, S., & Jiao, Z. (2020). The Impact of Technological Innovation and Public-private Partnership Investment on Sustainable Environment in China: Consumption-based Carbon Emissions Analysis. *Sustainable Development*, 28(5), 1317-1330.
- Kihombo, S., Ahmed, Z., Chen, S., Adebayo, T. S., & Kirikkaleli, D. (2021). Linking Financial Development, Economic Growth, and Ecological Footprint: What is the Role of Technological Innovation?. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(43), 61235-61245.
- Kirikkaleli, D., & Adebayo, T. S. (2021). Do Renewable Energy Consumption and Financial Development Matter for Environmental Sustainability? New Global Evidence. *Sustainable Development*, 29(4), 583-594.
- Kocak, E., & Alnour, M. (2022). Energy R&D Expenditure, Bioethanol Consumption, and Greenhouse Gas Emissions in the United States: Non-linear Analysis and Political Implications. *Journal of Cleaner Production*, 374, 133887.
- Koçak, E., & Ulucak, Z. Ş. (2019). The Effect of Energy R&D Expenditures on CO₂ Emission Reduction: Estimation of the STIRPAT Model for OECD Countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 14328-14338.
- Kynčlová, P., Upadhyaya, S., & Nice, T. (2020). Composite Index as a Measure on Achieving Sustainable Development Goal 9 (SDG-9) Industry-Related Targets: The SDG-9 Index. *Applied Energy*, 265, 114755.
- Li, J., Dong, K., Wang, K., & Dong, X. (2023). How Does Natural Resource Dependence Influence Carbon Emissions? The Role of Environmental Regulation. *Resources Policy*, 80, 103268.
- MacKinnon, J. G. (1996). Numerical Distribution Functions for Unit Root and Cointegration Tests. *Journal of applied econometrics*, 11(6), 601-618.
- Mensah, C. N., Long, X., Boamah, K. B., Bediako, I. A., Dauda, L., & Salman, M. (2018). The Effect of Innovation on CO₂ Emissions of OCED Countries from 1990 to 2014. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 29678-29698.
- Mirza, F. M., Sinha, A., Khan, J. R., Kalugina, O. A., & Zafar, M. W. (2022). Impact of Energy Efficiency on CO₂ Emissions: Empirical Evidence from Developing Countries. *Gondwana Research*, 106, 64-77.
- Narayan, P. K., & Smyth, R. (2006). What Determines Migration Flows from Low-Income to High-Income Countries? An Empirical Investigation of Fiji–Us Migration 1972–2001. *Contemporary Economic Policy*, 24(2), 332-342.
- Noor, M., Khan, D., Khan, A., & Rasheed, N. (2024). The Impact of Renewable and Non-Renewable Energy on Sustainable Development in South Asia. *Environment, Development and Sustainability*, 26(6), 14621-14638.
- Oğuztürk, B. S., & Özbay, F. (2022). The Relationship Between Green Innovation, CO₂ Emissions, Gross Domestic Product, and Renewable Energy Supply: a Panel Data Analysis for BRICS Countries and Turkey. *İstanbul Business Research*, 51(1), 237-256.
- Özbuğday, F. C., & Erbas, B. C. (2015). How Effective are Energy Efficiency and Renewable Energy in Curbing CO₂ Emissions in the Long Run? A Heterogeneous Panel Data Analysis. *Energy*, 82, 734-745.
- Özkan, O., Khan, N., & Ahmed, M. (2023). Impact of Green Technological Innovations on Environmental Quality for Turkey: Evidence from the Novel Dynamic ARDL Simulation Model. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(28), 72207-72223.

- Pao, H. T., & Tsai, C. M. (2010). CO2 Emissions, Energy Consumption and Economic Growth in BRIC Countries. *Energy policy*, 38(12), 7850-7860.
- Perron, P. (1990). Testing for a Unit Root in a Time Series with a Changing Mean. *Journal of Business & Economic Statistics*, 8(2), 153-162.
- Petrović, P., & Lobanov, M. M. (2020). The Impact of R&D Expenditures on CO2 Emissions: Evidence from Sixteen OECD Countries. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119187.
- Porter, M. E. (1990). *The Competitive Advantage of Nations*. Harvard Business Review
- Qoyash, F. K., & Eren, M. (2022). Türkiye’de Teknolojik İnovasyon ve Yenilenebilir Enerji Tüketiminin Çevre Kirliliği Üzerine Etkisi. *Ardahan Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 4(2), 110-118.
- Rasheed, M. Q., Yuhuan, Z., Haseeb, A., Ahmed, Z., & Saud, S. (2024). Asymmetric Relationship Between Competitive Industrial Performance, Renewable Energy, Industrialization, and Carbon Footprint: Does Artificial Intelligence Matter for Environmental Sustainability? *Applied Energy*, 367, 123346.
- Rees, W. E. (1992). Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity: What Urban Economics Leaves Out. *Environment And Urbanization*, 4(2), 121-130.
- Shahbaz, M., Nasir, M. A., Hille, E., & Mahalik, M. K. (2020). UK's Net-zero Carbon Emissions Target: Investigating the Potential Role of Economic Growth, Financial Development, and R&D Expenditures Based on Historical Data (1870–2017). *Technological Forecasting and Social Change*, 161, 120255.
- Shan, S., Genç, S. Y., Kamran, H. W., & 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.
- Shokoohi, Z., Dehbidi, N. K., & Tarazkar, M. H. (2022). Energy Intensity, Economic Growth and Environmental Quality in Populous Middle East Countries. *Energy*, 239, 122164.
- Siche, R., Pereira, L., Agostinho, F., & Ortega, E. (2010). Convergence of Ecological Footprint and Energy Analysis as a Sustainability Indicator of Countries: Peru as Case Study. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(10), 3182-3192.
- Sohag, K., Al Mamun, M., Uddin, G. S., & Ahmed, A. M. (2017). Sectoral Output, Energy Use, and CO 2 Emission in Middle-Income Countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 9754-9764.
- Subochev, A., & Zakhlebin, I. (2016). Alternative Versions of the Global Competitive Industrial Performance Ranking Constructed by Methods from Social Choice Theory. *ArXiv Preprint arXiv:1607.02421*.
- Sun, X., Zhang, R., Yu, Z., Zhu, S., Qie, X., Wu, J., & Li, P. (2024). Revisiting the Porter Hypothesis within the Economy-Environment-Health Framework: Empirical Analysis from a Multidimensional Perspective. *Journal of Environmental Management*, 349, 119557.
- Tajudeen, I. A., Wossink, A., & Banerjee, P. (2018). How Significant is Energy Efficiency to Mitigate CO2 Emissions? Evidence from OECD Countries. *Energy Economics*, 72, 200-221.
- Tang, C. F., & Tan, E. C. (2013). Exploring the Nexus of Electricity Consumption, Economic Growth, Energy Prices and Technology Innovation In Malaysia. *Applied Energy*, 104, 297-305.
- United Nations Industrial Development Organization. (t.y.). CIP: Competitive Industrial Performance Analytical Tool. UNIDO Statistics Portal. Erişim tarihi 22 Haziran 2025, adresi <https://stat.unido.org/analytical-tools/cip?country=792>

- Upadhyaya, S. (2019). Composite Indicator of Industrial development for International Comparative Analysis [Сводный показатель промышленного развития для международного сравнительного анализа]. *Voprosy Statistiki (Statistics Issues)*, 26(1), 35-43.
- Usman, M., & Balsalobre-Lorente, D. (2022). Environmental Concern in the Era of Industrialization: can Financial Development, Renewable Energy and Natural Resources Alleviate Mome Load?. *Energy Policy*, 162, 112780.
- Usman, O., Alola, A. A., & Saint Akadiri, S. (2022). Effects of Domestic Material Consumption, Renewable Energy, and Financial Development on Environmental Sustainability in the EU-28: Evidence from a GMM Panel-VAR. *Renewable Energy*, 184, 239-251.
- World Intellectual Property Organization (2024). Global Innovation Index Ranking. Retrieved December 1, 2024, <https://www.wipo.int/gii-ranking/en/rank>
- Xu, Y., Umar, M., Kirikkaleli, D., Adebayo, T. S., & Altuntaş, M. (2022). Carbon Neutrality Target in Turkey: Measuring the Impact of Technological Innovation and Structural Change. *Gondwana Research*, 109, 429-441.
- Yiğit, S. (2014). İnovasyonun Çevreci Yüzü ve Türkiye. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 21(1), 251-265.
- Yuhuan, Z., Rasheed, M. Q., & Saud, S. (2024). Environmental Deterioration in the Age of Industrialization and Production: do Industrial Competition and Renewable Energy Reduce the Ecological Burden?. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(2), 2258-2278.
- Yurdakul, M., & Kazan, H. (2020). Effects of Eco-innovation on Economic and Environmental Performance: Evidence from Turkey's Manufacturing Companies. *Sustainability*, 12(8), 3167.
- Zhou, R., Zheng, L., Li, L., Iqbal, N., & Fareed, Z. (2023). Energy Efficiency and China's Carbon Emissions: Evidence from Non-Parametric Approaches. *Energy Efficiency*, 16(6), 63.
- Zhou, Z., Ye, X., & Ge, X. (2017). The Impacts of Technical Progress on Sulfur Dioxide Kuznets Curve in China: a Spatial Panel Data Approach. *Sustainability*, 9(4), 674.
- Zhu, H., Duan, L., Guo, Y., & Yu, K. (2016). The Effects of FDI, Economic Growth and Energy Consumption on Carbon Emissions in ASEAN-5: Evidence from Panel Quantile Regression. *Economic Modelling*, 58, 237-248.
- Zivot, E., Andrews, D.W.K., (1992), Further Evidence on the Great Crash, the Oil Price Shock and the Unit Root Hypothesis. *Journal of Business and Economic Statistics*, 10, 251-270.

**ASYMMETRIC RELATIONSHIP BETWEEN COMPETITIVE INDUSTRIAL
PERFORMANCE AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY IN TURKEY:
ARE INNOVATION AND NON-RENEWABLE ENERGY EFFICIENCY
IMPORTANT FOR A SUSTAINABLE ENVIRONMENT?**

Extended Abstract

Aim: This study investigates the impact of non-renewable energy efficiency, innovation, and industrial performance on LCF by applying the Fractional Fourier NARDL model to the Turkish economy dataset from 1990 to 2021. In particular, since the CIP variable follows a fluctuating course in Turkey, the asymmetric properties of its effect on LCF are analysed by separating this variable into positive and negative shocks.

Method(s): The study preferred the NARDL method developed by Shin et al. (2014). The NARDL method provides better results in size and power properties in small samples and allows the examination of the relationships between stationary variables of different orders. There are some steps to applying the NARDL method. In the first stage, ADF and Fourier-ADF (Enders & Lee, 2012) unit root tests were applied to assess the stationarity of time series data. The Fourier Augmented Dickey-Fuller (FADF) test was preferred because it uses trigonometric terms to capture any structural changes in the variables used in the study, does not require the use of dummy variables and includes asymmetric relationships in the model. In the second stage, the co-integration relationship between the series was estimated using the Fourier-NARDL method.

Findings: According to the study, non-renewable energy efficiency based on fossil resources increases environmental quality in the long run. A 1% increase in non-renewable energy efficiency increases environmental quality (Load Capacity Factor, LCF) by 1.57%. Energy consumption, the driving force of economic growth, is heavily based on fossil resources that pollute the environment, and practices that increase energy efficiency (producing more output using less energy) reduce the negative impact of non-renewable energy use on the environment. Increases in innovation, where the number of patent applications by residents and non-residents is taken as a measure, are found to decrease environmental quality in Turkey, contrary to the widespread literature. A 1% increase in innovation decreases the LCF variable by 0.03%. This result stems from the fact that economic growth has been prioritized over improving environmental quality since the early stages of development in Turkey and that there has not been enough environmental awareness due to the lack of a certain level of national income per capita. Fluctuations in the CIP variable, which measures the industrialization intensity of a country and its impact on the global market, affect environmental quality. Positive shocks in the CIP variable (when the economy is doing well) worsen environmental quality by reducing LCF by 5.14%. Adverse shocks in the CIP variable (when things are not going well in the economy) similarly worsen environmental quality by reducing LCF by 2.58%. This shows that adverse shocks, like positive shocks in the CIP variable, worsen environmental quality in Turkey. Therefore, adopting competitive industrial performance worsens environmental quality during the upturn of the business cycle and then negatively affects environmental quality during the downturn of the business cycle.

Conclusion: This study's empirical findings can serve as a resource for policymakers who want to guide the country. The study offers some recommendations to improve decision-making processes by analyzing the data.

I) The findings suggest that increasing the efficiency of non-renewable energy sources is key to promoting environmental sustainability and quality. Policymakers should develop strategies that promote better use of these resources through awareness campaigns and educational programs for households, businesses and industries. Equipping these groups with the tools to use energy wisely can improve environmental quality and promote a healthier world.

II) Technological innovations in developing countries such as Turkey aim for economic growth, achieved at the expense of deteriorating environmental quality. While these innovations stimulate the economy, they can also threaten sustainable development. To address these threats, it is important to rethink existing environmental policies. Policymakers should develop plans that adopt stricter emission regulations, promote cleaner technologies and invest in renewable energy. In this way, these countries can grow economically while protecting the environment for the future.

III) The findings show that adopting competitive advantages worsens the environment. Therefore, policies that set out the basic principles for improving environmental quality without jeopardizing industrial competitive advantage should be a primary goal for Turkey. Turkey should invest more in renewable energy, especially nuclear energy, to achieve this goal. These investments are necessary to meet the growing demand for clean energy and reduce dependence on imported fossil fuels that harm the economy and the environment. By focusing on these energy sources, Turkey can channel funds from energy imports into developing green economic strategies, promoting sustainable growth and a healthier environment for future generations.

Implementing these recommendations could lead policymakers to prioritize sustainable development over economic growth. These policy-level transformations can help Turkey achieve SDG 4 (quality education), SDG 7 (affordable and clean energy), SDG 8 (decent work and economic growth), SDG 9 (industry, innovation and infrastructure), SDG 12 (ensuring sustainable production and consumption patterns), and SDG 13 (climate action), among others.
