

# BÖLÜM 11

## TÜRKİYE’DE DİJİTALLEŞMENİN KARBON EMİSYONU ÜZERİNDEKİ ETKİSİ: ARDL YAKLAŞIMI

Zeliha Semra KILINÇ<sup>1</sup>

### Özet

Bu çalışma, Türkiye’de dijitalleşmenin karbon emisyonları üzerindeki etkisini 2000–2021 dönemi verileriyle inceleyerek dijital dönüşüm sürecinin çevresel sonuçlarını değerlendirmektedir. Dijitalleşme düzeyini yansıtan geniş bant abone sayısı, internet kullanım oranı ve mobil internet aboneliği ayrı ayrı modele dâhil edilmiş ve her üç göstergenin de emisyonlar üzerinde artırıcı bir etki yarattığı bulunmuştur. Sonuçlar, dijital altyapının genişlemesi ve internet kullanımının yaygınlaşmasının enerji talebini yükselterek çevresel baskıyı artırdığını göstermektedir. Bulgular aynı zamanda Türkiye’nin dijitalleşme sürecinin mevcut enerji yapısıyla birlikte değerlendirildiğinde sürdürülebilirlik açısından riskler barındırdığını ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, dijital dönüşümün çevresel maliyetlerini azaltmak amacıyla veri merkezlerinin yenilenebilir enerjiyle çalışmasının teşvik edilmesi, dijital cihaz ve altyapıda enerji verimliliği standartlarının güçlendirilmesi, akıllı şebeke ve akıllı şehir uygulamalarının yaygınlaştırılması ve düşük karbonlu dijital hizmetleri destekleyecek düzenleyici çerçevenin oluşturulması önerilmektedir. Elde edilen sonuçlar, Türkiye’nin dijitalleşme sürecini enerji dönüşümüyle uyumlu şekilde

<sup>1</sup> Öğr. Gör. Dr., Finans, Bankacılık ve Sigortacılık Bölümü, Yenipazar Meslek Yüksekokulu, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın, Türkiye. E-posta: z.kilinc@adu.edu.tr | ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9837-1587>

planlaması gerektiğine işaret ederek politika yapıcılara önemli bir yol haritası sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Dijitalleşme, Karbon Emisyonu, ARDL Yaklaşımı

**JEL Kodları:** O33, Q53, C32

## THE IMPACT OF DIGITALIZATION ON CARBON EMISSIONS IN TURKEY: AN ARDL APPROACH

### Abstract

This study evaluates the environmental consequences of the digital transformation process by examining the impact of digitalization on carbon emissions in Turkey using data from the 2000–2021 period. The number of broadband subscribers, internet usage rates, and mobile internet subscriptions—reflecting the level of digitalization—were included in the model separately, and it was found that all three indicators have an increasing effect on emissions. The results indicate that the expansion of digital infrastructure and the widespread use of the internet increase environmental pressure by raising energy demand. The findings also reveal that Turkey's digitalization process poses risks in terms of sustainability when evaluated in conjunction with the current energy structure. Accordingly, to reduce the environmental costs of digital transformation, it is recommended to incentivize the operation of data centers with renewable energy, strengthen energy efficiency standards in digital devices and infrastructure, expand smart grid and smart city applications, and establish a regulatory framework to support low-carbon digital services. The obtained results suggest that Turkey needs to plan its digitalization process in harmony with the energy transition, providing a crucial roadmap for policymakers.

**Keywords:** Digitalization, Carbon Emissions, ARDL Approach

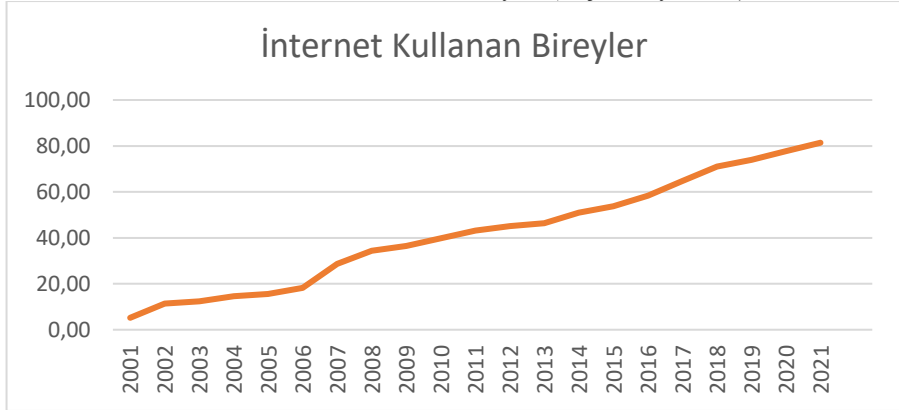
**JEL Codes:** O33, Q53, C32

## 1. GİRİŞ

Küresel ısınmanın sonuçlarından olan karbon emisyonundaki artış iklim değişikliğine neden olurken aynı zamanda tüm canlılar için hayati öneme sahiptir. Öyle ki yaşanan aşırı hava olaylarının, halk sağlığında yaşanan ciddi risklerin ve toplumsal krizlerin oluşmasındaki nedenlerin arasında karbon salınımındaki artış rol almaktadır (Zheng vd., 2023). Karbon emisyonundaki artış ve buna bağlı olarak yaşanan iklim değişikliklerinin yarattığı negatif etkilerin azaltılması tüm ülkelerin ortak sorunudur. Bu sorun ilk defa 1972’de Birleşmiş Milletler (BM) yürüttüğü Stockholm Konferansı’nda tartışmaya açılmıştır. 1972 yılından günümüze kadar geçen süreçte, bazı ülkeler kendi yarattığı karbon emisyonunu azaltma hedefini kendisi belirlerken bazı ülkeler ise ortaklaşa emisyon azaltım hedefleri belirlemişlerdir. Küresel olarak karbon emisyonunun azaltılması konusunda Birleşmiş Milletler (BM) öncülüğünde Avrupa Birliği’nin (AB) aldığı kararlar önem arz etmektedir. Bu bağlamda atılan adımlardan Türkiye’nin de aralarında bulunduğu Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) ve sözleşmenin gereği sera gazı azaltımına gönüllü ve taraf ülkeleri bağlayan uygulamaları içermektedir. UNFCCC’nin yürürlüğe girmesinin ardından devam eden ülkeler arasındaki müzakerelerden sonuncusu olan ve 2021 yılında yayınlanan Avrupa Yeşil Mutabakatı (AYM) ile Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) yaptırımları dolayısıyla sera gazı azaltım hedefini yakalayabilecek gerçekçi bir uygulama olarak görülmektedir. SKDM göre ilk olarak üretimden kaynaklı en çok sera gazı salınımını yapan beş sektörün emisyon azaltımı öncelikli olarak hedeflenmiştir. Bunlar sırasıyla; enerji, demir-çelik, çimento, alüminyum ve gübre sektörleridir. Her yıl taraf ülkeler bu beş sektörde üretimden kaynaklı yaydıkları sera gazı miktarını rapor etmektedirler. 2026 yılında ise AB ülkeleri ile dış ticaret gerçekleştiren tüm ülkelerin izin verilen emisyon miktarından fazlasını aşan kısımlar için ton başına belirlenen ücreti AB sınırında ödemek zorundadır. Uygulama esasında emisyon azaltımını vergilendirerek diğer bir deyişle üretim esnasında yayılan karbon bedelini ödetmek suretiyle gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Üretimden kaynaklanan emisyon miktarının izin verilen emisyon miktarının üzerinde gerçekleşmesi, Türkiye’nin ihracatta AB’nin en önemli partneri olmasından dolayı ek maliyetlere ve ihracatın olumsuz etkilenmesine neden olabilir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde karbon

emisyonunu azaltacak yeşil teknolojilere geçilmesinin önemli olduğu kadar karbon emisyonunun belirleyicilerinin araştırılarak ortaya koyulması önem arz etmektedir. Karbon emisyonu artışına neden olan enerji kullanımındaki artış yalnızca üretimle alakalı değil aynı zamanda dijitalleşmenin getirdiği bir sonuç olarak ta kendini göstermektedir. Dijitalleşme; iletişim, bilgi teknolojileri ve internet gelişiminin daha ileri bir aşaması olarak değerlendirilmektedir. Literatürde bazı araştırmacılar dijitalleşmeyi, işletme modelleri ile hizmet mekanizmalarının teknoloji yardımıyla dönüşmesi ve bu süreçte dijital ortamda yeni değerlerin üretilip paylaşılması şeklinde tanımlamaktadır (Annarelli vd., 2021; Kohtamäki vd., 2019; Rachinger vd., 2019). Xu vd., (2022b) ise dijitalleşmeyi; veri, bilgi ve bilgelikten faydalanarak üretkenliği yükseltmeye odaklanan, teknoloji temelli ekonomik faaliyetler bütünü olarak ifade etmiştir. Genel olarak dijitalleşme, dijital teknolojilerin uygulanması sonucunda ortaya çıkmakta; üretim süreçlerini, yaşam tarzlarını dönüştürmekte ve yönetim anlayışını yeniden biçimlendirmektedir. Türkiye’de dijitalleşme özellikle 2000 yılından itibaren hız kazanmıştır. Dünya bankası verilerinden elde edilen dijitalleşme göstergelerinden biri olan nüfusta internet kullanma oranı aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.

**Şekil 1. İnterneti Kullanan Bireyler (nüfusun yüzdesi)**



**Kaynak:** Worldbank datasından elde edilen verilerle yazar tarafından hazırlanmıştır.

Şekil 1’de 2001–2021 döneminde Türkiye’de internet kullanan bireylerin nüfusa oranındaki gelişimi göstermektedir. 2001 yılında oran yalnızca %5 düzeyindeyken, 2003 yılında e-Türkiye girişimi ile kamu hizmetlerinde dijitalleşme politikalarının başlatılması bu oranı yukarıya

doğru ivmelendirmiştir. 2006'da oran yaklaşık %18 seviyesindedir ve bu dönemde geniş bant internet altyapısının yaygınlaşmaya başlaması ve mobil teknolojilerdeki gelişmeler etkili olmuştur. 2008 yılı itibarıyla oran %35'in üzerine çıkarken, 2008'de e-Devlet Kapısı'nın (turkiye.gov.tr) hizmete açılması dijital hizmetlere erişimi artırarak internet kullanımının hızlanmasında kritik bir rol oynamıştır. 2010'lu yıllara gelindiğinde internet kullanım oranı %40'ı aşmış, 2013'te yaklaşık %50'ye ulaşmıştır. Bu dönemde akıllı telefonların hızla yayılması, 3G'nin (2009) ve ardından 4.5G'nin (2016) devreye alınması internet erişimini daha da kolaylaştırmıştır. 2017'de internet kullanım oranı %70'i geçerek toplumun büyük kesimi için dijital teknolojilerin gündelik yaşamın bir parçası haline geldiğini göstermektedir. Son yıllarda artış eğilimi devam etmiş, 2021'de oran %80'in üzerine çıkarak Türkiye'nin dijitalleşme sürecinde kitlesel bir internet kullanım düzeyine ulaştığını ortaya koymuştur. Bu gelişmeler, dijital altyapı yatırımlarının, mobil teknolojilerdeki yeniliklerin ve kamu hizmetlerinde dijital dönüşüm projelerinin internet kullanımının yaygınlaşmasına doğrudan katkı sağladığını göstermektedir. Özellikle e-Devlet uygulamaları, geniş bant erişimin artışı ve mobil internet hizmetlerinin yaygınlaşması grafikteki kırılma noktalarının temel nedenleridir.

Dijitalleşme, günümüzün yeni sanayi devrimine yön vermekte ve endüstride köklü dönüşümlere neden olmaktadır. Aynı zamanda küresel ölçekte üretim faktörlerinin yeniden düzenlenmesinde, yaşam tarzlarının ve üretim süreçlerinin değişiminde, ayrıca dünya ekonomisinin yeniden şekillendirilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Özellikle büyük veri, 5G, bulut teknolojileri, Nesnelerin İnterneti ve dijital ikiz gibi yeni nesil bilişim uygulamalarının hızlı ilerleyişi; sanayi zincirinin verimliliğini artırmış, bilgi eşitsizliklerini azaltmış, kaynakların daha etkin kullanılmasına imkân tanımış ve hem ekonomik kalkınma hem de toplumsal dönüşüm için güçlü bir ivme yaratmıştır (Brenner ve Hartl, 2021). Bununla birlikte dijitalleşmenin sürdürülebilirlik odaklı yaygın uygulamaları, çevresel performansın geliştirilmesinde önemli bir araç olarak giderek daha fazla kabul edilmektedir (Ghobakhloo, 2020). Dijital teknolojilerin sağladığı kapsamlı veri kullanımı, üretim süreçlerinde verimliliği artırmakta, kaynak israfını azaltmakta ve böylece gerçek zamanlı ekipman yönetimi ile ayrıntılı üretim kontrolü sayesinde enerji tüketimini düşürmektedir. Dijital uygulamalar ile ekolojik çevre korumasının bütünleşmesi, akıllı, esnek ve dinamik düzenleme ile

yönetişim pratiklerini desteklemektedir. Küresel ölçekte incelenen çalışmalarda dijitalleşme iki boyutta tartışılmaktadır. Dijitalleşme süreci, büyük hacimli verilerin saklanması ve işlenmesi ihtiyacını beraberinde getirdiği için enerji tüketimini ve elektrik talebini yükseltmektedir (Cho vd., 2007). Bunun yanı sıra dijital ürün ve hizmetlerin oluşturduğu yoğun enerji gereksinimi, ekonomik büyüme ile birleşerek karbon emisyonlarının artmasına zemin hazırlamaktadır (Salahuddin ve Alam, 2016). Bir diğer boyut ise dijitalleşmenin üretim, ulaşım, tüketim, enerji ve günlük yaşam sistemlerinde dijital teknolojilerin kullanılması yoluyla enerji verimliliğini artırabilir ve karbonun azaltımı ya da yönetimini kolaylaştırabilir olması yönündedir. Bu bağlamda dijital yenilikler, süreçlerin daha etkin yürütülmesini, kaynakların daha rasyonel kullanılmasını ve enerji talebinin düşmesini sağlayarak karbon salımlarını azaltıcı bir rol üstlenebilmektedir (Wang vd., 2022c; Zhang vd., 2023a). Ayrıca dijitalleşme; yeşil ve akıllı üretimi teşvik etme, akıllı ulaşım sistemlerini destekleme, binaların yaşam döngüsü boyunca enerji tüketimini düşürme ve kamu hizmetlerinde dijital yönetimi geliştirme aracılığıyla farklı sektörlerde çevre dostu üretim ve yaşam biçimlerinin yaygınlaşmasına katkı sunmaktadır. Böylece sürdürülebilir enerji kullanımını teşvik ederek düşük karbonlu dönüşüm sürecini hızlandırabilmektedir (Lin ve Zhou, 2021; Kurniawan vd., 2022; Rowan vd., 2022; Wang vd., 2023). Dolayısıyla dijitalleşmenin karbon emisyonu ile ilişkisi karmaşık ve çok boyutludur. Bu bağlamda dijitalleşme ve karbon emisyonu arasındaki ilişkinin araştırılması dijital dönüşümün çevresel etkilerinin daha iyi anlaşılmasına, politika yapıcılarının düşük karbonlu kalkınma stratejileri geliştirmesine ve sürdürülebilir büyüme hedeflerine ulaşılmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

Bu çerçevede çalışma, Türkiye’de dijitalleşmenin çevresel etkilerini ortaya koymak amacıyla 2000–2021 dönemine ait yıllık verilerle dijitalleşme–karbon emisyonu ilişkisini incelemektedir. Dijitalleşme göstergeleri olarak sabit genişbant abone oranı, mobil internet kullanım oranı ve internet kullanıcı oranı kullanılmış; ilişkiler üç ayrı ARDL modeli aracılığıyla hem kısa hem de uzun dönem boyutunda analiz edilmiştir. Ampirik bulgular dijitalleşmenin enerji talebini artırmasıyla karbon emisyonlarını hem kısa hem de uzun vadede yükselttiğini göstermekte olup, dijital dönüşümün sürdürülebilirlik politikalarıyla birlikte ele alınması gerektiğine işaret etmektedir. Çalışma Türkiye özelinde dijitalleşme ve

karbon emisyonu arasındaki ilişkiyi araştırarak dijital dönüşümün çevresel etkilerini ortaya koymayı ve politika yapıcılar için sürdürülebilir kalkınma perspektifinde yol gösterici bulgular sunmayı amaçlamaktadır. Çalışma dört bölümden oluşmakta, ilk bölümde kavramsal çerçeve ile giriş bölümü, ikinci bölümde literatür taraması yer alırken üçüncü bölümde yöntem ve bulgulara yer verilerek dördüncü bölüm sonuç ve politika çıkarımlarından oluşmaktadır.

## 2. LİTERATÜR

Temelde dijitalleşme, dijital teknolojilerin uygulanması sonucunda ortaya çıkmakta; bireylerin üretim alışkanlıklarını ve yaşam tarzlarını dönüştürmekte, aynı zamanda yönetim anlayışını yeniden şekillendirmektedir. Bu dönüşüm süreci, karbon emisyonlarıyla çift yönlü bir ilişkiye sahiptir. Bir yandan dijitalleşme, büyük ölçekli veri depolama ve işlem kapasitesi gerektirdiğinden enerji tüketimini artırmakta ve bu durum emisyonların yükselmesine yol açabilmektedir. Diğer yandan dijital teknolojilerin üretim, ulaştırma, enerji ve tüketim sistemlerinde yaygınlaşması süreçlerin daha verimli işlenmesini, kaynakların daha etkin kullanılmasını ve enerji tasarrufunu mümkün kılarak karbon salımlarını azaltıcı etkiler de yaratabilmektedir. Dolayısıyla dijitalleşmenin karbon emisyonları üzerindeki etkisi tek yönlü değil; kullanılan teknolojilerin niteliğine, ekonomik yapıya ve sürdürülebilirlik politikalarının etkinliğine bağlı olarak değişebilen karmaşık bir yapıya sahiptir. Literatürde dijitalleşme ve karbon ilişkisini inceleyen çalışmalarda farklı değişken setleri, ülke grupları ve ekonometrik yöntemler kullanılmaktadır. Örneğin Lee ve Brahmasrene, (2014) ASEAN ülkeleri için 1980–2010 dönemini kapsayan çalışmalarında internet kullanımı, enerji tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyonları arasındaki ilişkiyi panel VECM yöntemiyle incelemiş ve internet kullanımının enerji tüketimi üzerinden emisyonları artırdığını göstermiştir. Sadorsky, (2012) OECD ülkelerinde 1980–2006 dönemini panel GMM yöntemiyle analiz ederek telekomünikasyon altyapısının enerji talebini artırdığını bulmuştur. Salahuddin ve Alam, (2016) ise Körfez ülkeleri için panel ARDL modeli kullanmış ve 1990–2012 döneminde internet kullanımının uzun dönemde karbon emisyonları üzerinde pozitif etkili olduğunu ortaya koymuştur. Dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik

açısından farklı etkilere sahip olduğuna ilişkin çalışmalar da mevcuttur. Miao vd., (2022a) Çin'in 30 bölgesi için 2006–2019 döneminde panel ARDL (PMG) yöntemi uygulayarak dijital ekonomi endeksinin kısa dönemde emisyonları artırdığını ancak uzun dönemde enerji verimliliğini yükselterek azaltıcı etki yarattığını ortaya koymuştur. You ve Zhang, (2022) 2005–2019 dönemini kapsayan çalışmalarında FMOLS yöntemiyle dijital ekonominin karbon yoğunluğunu azalttığını göstermiştir. Lin ve Huang, (2023) Çin'de 2001–2020 dönemine ilişkin verilerle Markov-switching modelini kullanarak dijitalleşmenin erken aşamalarda elektrik tüketimini artırdığını, olgunluk aşamasında ise emisyonları düşürdüğünü tespit etmiştir. Guo vd., (2022b) de 2006–2019 dönemini içeren panel veri seti üzerinde NARDL analizi uygulayarak dijitalleşmenin emisyonlar üzerinde asimetric etkiler yarattığını; pozitif dijitalleşme şoklarının emisyonu artırırken negatif şokların azalttığını göstermiştir. Ayrıca Sun vd., (2022) STIRPAT ve ridge regression yöntemlerini kullanarak dijitalleşmenin uzun vadede sürdürülebilir enerji kullanımını desteklediğini belirtmiştir. Zhang ve Liu, (2021) ise makine öğrenmesi ve LMDI ayrıştırma tekniği ile dijitalleşmenin sanayi süreçlerinde enerji verimliliğini artırarak emisyonları azalttığını bulmuştur. Ma ve Zhu, (2022) Çin için 2003–2020 dönemi verilerini kullanarak ARDL ve yapısal kırılma analizleri gerçekleştirmiş ve dijital altyapı yatırımlarının uzun dönemde enerji verimliliğini artırarak karbon emisyonlarını düşürdüğünü tespit etmiştir. Bununla birlikte dijitalleşmenin ilk aşamalarında telekom altyapısı, nesnelerin interneti ağları, baz istasyonları, bulut bilişim altyapıları ve yapay zekâ tabanlı sistemler önemli ölçüde elektrik tüketimi gerektirmektedir. Bu durum dijital teknolojilerin başlangıç döneminde emisyonları artırıcı yönde etkili olmasına yol açmaktadır. Dijitalleşme olgunlaştıkça enerji verimliliği artmakta, veri işleme kapasitesi iyileşmekte ve buna bağlı olarak dijital altyapının emisyon etkisi azalmaktadır. Ayrıca veri merkezli dijital uygulamaların yüksek paylaşım kapasitesi ve işlem verimliliği aracılığıyla çevresel etkileri azaltabileceği de belirtilmektedir. Miao vd., (2022b) 2006–2019 dönemini kapsayan panel PMG/ARDL analiziyle dijital teknolojilerin akıllı üretim ve büyük veri uygulamalarıyla bütünleşmesinin enerji yoğunluğunu düşürdüğünü ve karbon emisyonlarını azaltıcı etki yarattığını göstermiştir.

Türkiye'de dijitalleşme ve karbon emisyonu ilişkisini inceleyen çalışmalar sınırlı sayıda olup daha çok son dönemde artış göstermiştir.

Yıldırım ve Yıldırım, (2024) 1996–2021 dönemine ait verileri Fourier-ARDL yöntemiyle analiz etmiş ve internet kullanımının uzun dönemde karbon emisyonlarını artırdığını tespit etmiştir. Karanfil vd., (2024) ise 2000–2022 dönemini kapsayan çalışmalarında STIRPAT–ARDL yaklaşımını kullanarak dijitalleşme göstergelerinin enerji tüketimi üzerinden CO<sub>2</sub> emisyonlarını yükselttiğini bulmuştur. Türkiye literatüründe veri merkezli dijitalleşme ve karbon emisyonu ilişkisine yönelik çalışmaların azlığı, mevcut araştırmanın literatürdeki boşluğu doldurmasına önemli katkı sağlamaktadır.

### 3. YÖNTEM VE BULGULAR

Ekonomik değişkenler arasındaki kısa ve uzun dönemli ilişkilerin incelenmesinde çeşitli eşbütünleşme testleri kullanılmaktadır. Geleneksel yaklaşımda Engle ve Granger, (1987) Johansen, (1988) ve Johansen ve Juselius, (1990) tarafından geliştirilen yöntemler uzun dönemli bağları araştırmada yaygın biçimde uygulanmaktadır. Bu çalışmada ise, değişkenlerin bütünleşme derecelerinin  $I(0)$  ve  $I(1)$  düzeylerinde farklılık göstermesi nedeniyle Pesaran, Shin ve Smith, (2001) tarafından geliştirilen otoregresif dağıtılmış gecikmeler (ARDL) sınır testi yaklaşımı tercih edilmiştir. ARDL yaklaşımı, geleneksel eşbütünleşme testlerinden farklı olarak serilerin aynı dereceden durağan olmasını gerektirmez; serilerin  $I(0)$  ya da  $I(1)$  düzeyinde olması durumunda da uzun dönem ilişkisinin varlığı araştırılabilir (Sharifi-Renani, 2007). Bununla birlikte, yöntemin geçerliliği açısından bağımlı değişkenin  $I(1)$ , açıklayıcı değişkenlerin ise  $I(0)$  ve/veya  $I(1)$  düzeyinde durağan olması beklenmektedir (Pesaran vd., 2001). Ayrıca ARDL metodunun önemli bir avantajı, küçük örneklem hacmine sahip veri setlerinde güvenilir ve tutarlı sonuçlar verebilmesidir. Ayrıca ARDL yaklaşımını yaklaşık yirmi yıllık veri setleri üzerinde uygulayan çeşitli çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Bu kapsamda, Pattichis, (1999) öncü katkıları sonrasında Mah, (2000) tarafından yapılan analizler yöntemin farklı bağlamlarda kullanılabilirliğini göstermiştir. Daha sonraki dönemde Al-Mulali, Solarin ve Oztürk (2016) enerji–çevre ilişkisini ARDL çerçevesinde ele alırken, Ali, Ullah ve Khan (2020) benzer modeli farklı ekonomik yapılar üzerinde test etmiştir. Ayrıca Al Qudah, Zouaoui ve Aboelsoud (2020) de uzun dönem dinamiklerini incelemek amacıyla ARDL yönteminden yararlanan önemli çalışmalardan biridir. Nitekim Narayan ve Smyth (2005)

da bu yöntemin küçük örneklem analizlerinde diğer eş bütünleşme tekniklerine göre daha sağlam bulgular sunduğunu belirtmektedir.

Modelde yer alan bağımlı ve bağımsız değişkenlerin durağanlık yapılarının belirlenmesi ve buna uygun ekonometrik yöntemin seçilmesi, elde edilecek bulguların güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, ampirik analizde ilk adım olarak değişkenlerin durağanlık özellikleri Kwiatkowski vd., (1992) tarafından geliştirilen KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin) testi ile Dickey ve Fuller (1981) tarafından ortaya konulan Genişletilmiş Dickey-Fuller (ADF) birim kök testi yardımıyla incelenmiştir. ADF testinde yokluk hipotezi serinin birim kök içerdiğini ifade ederken, KPSS testinde yokluk hipotezi serinin durağan olduğunu varsayar. Bu nedenle iki testin birlikte uygulanması, sapmalı sonuçların önüne geçilmesine olanak tanımaktadır. KPSS testinde hesaplanan istatistik kritik değerin altında kaldığında serinin durağan olduğu kabul edilirken, ADF testinde kritik değerin altında kalan istatistik değeri yokluk hipotezinin reddedildiğini göstermektedir.

Bu çalışmada yer alan değişkenlerin durağanlık özellikleri, Genişletilmiş Dickey-Fuller (ADF) ve KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin) testleri yardımıyla incelenmiştir. Serilerin durağanlık düzeyleri belirlendikten sonra eş bütünleşme analizi uygulanmış ve böylece değişkenler arasındaki uzun ve kısa dönemli ilişkiler ortaya konmuştur. Elde edilen test bulgularına dayanarak hem kısa dönem hem de uzun dönem katsayıları yorumlanmıştır. Çalışmada araştırılan dijitalleşmenin karbon emisyonları üzerindeki etkisi üç model üzerinden test edilmiştir. Ekonometrik olarak ARDL modelleri aynı anda birden fazla bağımsız değişkenin analize dâhil edilmesine imkân tanımaktadır. Ancak çalışmada üç ayrı model kurulmasının temel nedeni, dijitalleşmenin farklı boyutlarını temsil eden değişkenlerin (GBANT, INT, MAO) birbirleriyle yüksek korelasyona sahip olması ve birlikte modele dâhil edilmeleri durumunda çoklu doğrusal bağlantı sorununa yol açma ihtimalidir. Dijitalleşme göstergeleri aynı yapıyı temsil ettiğinden aynı modele eklendiklerinde katsayıların yönü ve büyüklüğü istikrarsızlaşmakta, standart hatalar artmakta ve model güvenirliliği azalmaktadır. Bu nedenle her bir dijitalleşme göstergesinin emisyonlar üzerindeki uzun dönem etkisini ayrı ayrı izole edebilmek için üç model oluşturulması tercih edilmiştir. Bu modellere ait denklemler sırasıyla gösterilmektedir.

$$\text{logems}_t = \beta_0 + \beta_1 \text{logint}_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\text{logems}_t = \beta_0 + \beta_1 \text{logmao}_t + \varepsilon_t \quad (2)$$

$$\text{logems}_t = \beta_0 + \beta_1 \text{loggbant}_t + \varepsilon_t \quad (3)$$

Pesaran vd., (2001) Denklem 1, 2, 3’de verilen uzun dönemli ilişkinin sınır testi yaklaşımı aracılığıyla tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, değişkenler arasındaki uzun dönem bağıını kısıtsız hata düzeltme modeli üzerinden tahmin etmeye dayanmaktadır. Çalışmada kullanılan ARDL modeline ise denklem 4’te yer verilmiştir.

$$\Delta Y_t = \mu + \rho_Y Y_{t-1} + \rho_X Z_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} a_i \Delta Y_{t-i} + \sum_{i=0}^{q-1} \beta_i \Delta Z_{t-i} + \varepsilon_t \quad (4)$$

### 3.1 Veri Seti

Çalışmada Türkiye’ye ait dijitalleşmenin toplam karbon emisyonu üzerindeki etkisi diğer bir ifadeyle aralarındaki ilişki test edilmektedir. Dijitalleşme değişkeni üç farklı gösterge ile üç farklı model kurularak test edilmektedir. Dijitalleşme göstergeleri sırasıyla, nüfusta internet kullanım oranı, mobil internet kullanım oranı ve geniş bant abone sayısıdır. Bağımlı değişken olan toplam karbon emisyonu bağımsız değişkenler ise nüfusta internet kullanım oranı, mobil internet kullanım oranı ve geniş bant abone sayısıdır.

Oluşturulan modellere ait denklemler aşağıdaki gibidir;

Toplam Karbon Emisyonu = f (Geniş Bant Abone Sayısı)

Toplam Karbon Emisyonu = f (Nüfusta İnternet Kullanım Oranı)

Toplam Karbon Emisyonu = f (Mobil İnternet Kullanım Oranı)

Modele ait değişkenler ve kaynakları Tablo 1’de açıklanmıştır.

**Tablo 1. Veri Seti ve Kaynakları**

| KISALTMA | TANIM                           | KAYNAK    |
|----------|---------------------------------|-----------|
| EMS      | Toplam Emisyon Miktarı          | TUİK      |
| GBANT    | Geniş Bant Aboneliği            | Worldbank |
| INT      | Nufusun İnternet Kullanma Oranı | Worldbank |
| MAO      | Mobil İnternet Abone Sayısı     | Worldbank |

Dijitalleşme göstergesi olarak seçilen üç farklı değişken, nüfusta internet kullanım oranı, mobil internet kullanım oranı ve geniş bant abone sayısı dünya bankasından, toplam karbon emisyon miktarı ise TUİK internet sitesinden elde edilmiştir. Dijitalleşme göstergesi olan verilerin resmi kaynaklarda yayınlanma tarihi 2000 yılından başladığı için veriler 2001-2021 aralığını kapsamaktadır.

*Tablo 2: Tanımlayıcı İstatistikler*

|                 | EMS       | GBANT     | INT      | MAO       |
|-----------------|-----------|-----------|----------|-----------|
| Ortalama        | 0.037278  | 0.370775  | 0.137632 | 0.060731  |
| Medyan          | 0.043228  | 0.119772  | 0.080923 | 0.020391  |
| Maksimum        | 0.103320  | 2.240695  | 0.786880 | 0.217620  |
| Minimum         | -0.042948 | -0.003044 | 0.026260 | -0.059889 |
| Standart Sapma  | 0.040043  | 0.544345  | 0.178886 | 0.085331  |
| Çarpıklık       | -0.342427 | 2.294514  | 2.809425 | 0.686435  |
| Basıklık        | 2.294116  | 8.033408  | 10.17562 | 2.009892  |
| Jarque-Bera     | 0.806082  | 38.66197  | 69.21747 | 2.387571  |
| Olasılık değeri | 0.668285  | 0.000000  | 0.000000 | 0.303072  |

Verilerin tanımlayıcı istatistikleri incelendiğinde, EMS değişkeninin ortalaması pozitif olup düşük varyansa sahiptir ve dağılımı normal dağılıma yakın bir yapı göstermektedir (Jarque-Bera olasılık değeri %5 anlamlılık düzeyinin üzerinde). Buna karşılık, GBANT ve INT değişkenlerinin yüksek çarpıklık ve basıklık değerleri nedeniyle normal dağılımdan önemli ölçüde saptığı ve Jarque-Bera testine göre anlamlı şekilde normal dağılmadığı görülmektedir. Özellikle GBANT değişkeninin ortalaması görece yüksek olup dağılımı pozitif yönde aşırı çarpıktır. MAO değişkeni ise pozitif ortalama değer göstermekte ve nispeten düşük varyansa sahip olmakla birlikte normal dağılımdan sapma istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Genel olarak sonuçlar, bazı serilerin istatistiksel özelliklerinin normal dağılım varsayımını karşılamadığını ve bu durumun ekonometrik modelleme sürecinde dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

### 3.1. Bulgular

Analizde kullanılacak ARDL modellerinin tahmin edilebilmesi için değişkenlerin bütünlüşme derecelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, çalışmada yer alan serilerin durağanlık yapısı daha sağlam ve karşılaştırılabilir şekilde yapılabilmesi amacıyla hem ADF hem de KPSS birim kök testleri ile incelenmiş durağanlık analizinin ADF testine ek olarak KPSS testi de uygulanmıştır. KPSS testi, serilerin trend yapısı ve varyans kararlılığına ilişkin ek bilgi sağlayarak ADF sonuçlarını destekleyen tamamlayıcı bir yöntem sunmaktadır. Böylece durağanlık bulgularının tutarlılığı artırılmış ve ARDL modeline geçmeden önce serilerin zaman serisi

özellikleri daha güvenilir biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2’de özetlenmiştir.

**Tablo 2: Birim Kök Testi Sonuçları**

|                     |             | <b>Değişkenler</b> | <b>ADF</b> | <b>KPSS</b> |
|---------------------|-------------|--------------------|------------|-------------|
| <b>Düzy</b>         | Sabit       | LEMS               | -3.3111(2) | 0.2171(3)   |
|                     |             | LGBANT             | -3.5160(4) | 0.4230(3)   |
|                     |             | LINT               | -1.6490(4) | 0.5301(1)   |
|                     |             | LMAO               | -2.7534(4) | 0.4088(3)   |
|                     | Sabit+Trend | LEMS               | -4.3279(2) | 0.1799(7)   |
|                     |             | LGBANT             | -3.0270(4) | 0.1613(2)   |
|                     |             | LINT               | -0.9785(4) | 0.1090(2)   |
|                     |             | LMAO               | -1.0560(4) | 0.1405(2)   |
| <b>Birinci Fark</b> | Sabit       | DLEMS              | -3.7103(4) | 0.2114(5)   |
|                     |             | DLGBANT            | -3.0700(3) | 0.0882(2)   |
|                     |             | DLINT              | -3.8914(1) | 0.2371(2)   |
|                     |             | DLMAO              | -2.6427(3) | 0.1274(1)   |
|                     | Sabit+Trend | DLEMS              | -3.5931(4) | 0.1701(5)   |
|                     |             | DLGBANT            | -0.8241(3) | 0.0880(2)   |
|                     |             | DLINT              | -4.4018(2) | 0.0985(2)   |
|                     |             | DLMAO              | -4.0229(3) | 0.0720(2)   |

**NOT:** KPSS testinde uygun gecikme sayısının belirlenmesinde Newey-West Bandwidth yöntemi kullanılmış olup, parantez içinde verilen değerler ilgili gecikme sayılarını göstermektedir. ADF testinde ise maksimum gecikme uzunluğu 3 olarak belirlenmiş ve en uygun gecikme sayısının seçiminde Akaike bilgi kriteri esas alınmıştır.

Çalışmada kullanılan değişkenlerin bütünleşme derecelerini belirlemek amacıyla ADF ve KPSS birim kök testleri uygulanmıştır. Düzy değerlerine ilişkin sonuçlar incelendiğinde, LEMS, LINT ve LMAO değişkenlerinin her iki test kriterine göre durağan olmadığı görülmektedir. Buna karşın LGBANT değişkeni düzyde kısmen durağan görünse de ADF ve KPSS sonuçları birlikte değerlendirildiğinde net bir durağanlık bulgusu elde edilememiştir. Birinci fark sonuçları ise tüm değişkenlerin hem ADF hem de KPSS testleri açısından durağan olduğunu göstermektedir. Buna göre değişkenlerin tamamının I(1) bütünleşme derecesine sahip olduğu söylenebilir. Bu durum, ARDL sınır testi yaklaşımının gereklilikleri ile uyumludur. Çünkü ARDL yönteminin uygulanabilmesi için değişkenlerin I(0) veya I(1) düzeyinde bütünleşik olması yeterlidir; hiçbir değişkenin I(2) olmaması temel koşuldur (Pesaran, Shin & Smith, 2001). Bu çerçevede serilerin tamamının I(1) olması, ARDL yaklaşımının tercih edilmesini

engellememekte; aksine küçük örneklemeler için sunduğu metodolojik avantajlar nedeniyle yöntemin kullanılmasını desteklemektedir.

### 3.2. ARDL Sınır Testi Sonuçları

Bu bölümde değişkenler arasındaki uzun dönemli ilişkiyi incelemek amacıyla gerçekleştirilen ARDL sınır testi sonuçları ele alınmaktadır. Sınır testi yaklaşımı, hesaplanan F-istatistiğinin alt ve üst kritik değerlerle karşılaştırılması yoluyla modelde eşbütünleşme ilişkisi olup olmadığını değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır. Bu kapsamda elde edilen ampirik sonuçlar Tablo 4'te detaylı biçimde sunulmaktadır.

**Tablo 3: Model 1**

|                                              |                   |                   |                           |         |                   |
|----------------------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|---------|-------------------|
| Eşbütünleşme Analizi<br>Model 1<br>ARDL(3,0) |                   | F İstatistiği     | %95 Altsınır %95 Üstsınır |         |                   |
|                                              |                   | 6.82              | 3.02 – 4.18               |         |                   |
| Uzun Dönem                                   |                   |                   | Kısa Dönem                |         |                   |
| Değişken                                     | Katsayı           | T İstatistiği     | Değişken                  | Katsayı | T İstatistiği     |
| ΔDLEMS                                       | -1.8711<br>(0.00) | -4.4171<br>(0.00) | ΔDLEMS                    | 0.8338  | 2.7323<br>(0.01)  |
| DLGBANT                                      | 0.0908<br>(0.00)  | 2.3666<br>(0.03)  | CointEq                   | -1.8711 | -4.8873<br>(0.00) |

**Tablo 4: Model 2**

|                                              |                   |                   |                           |                  |                   |
|----------------------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|------------------|-------------------|
| Eşbütünleşme Analizi<br>Model 2<br>ARDL(3,0) |                   | F İstatistiği     | %95 Altsınır %95 Üstsınır |                  |                   |
|                                              |                   | 7.24              | 3.02 – 4.18               |                  |                   |
| Uzun Dönem                                   |                   |                   | Kısa Dönem                |                  |                   |
| Değişken                                     | Katsayı           | T İstatistiği     | Değişken                  | Katsayı          | T İstatistiği     |
| ΔDLEMS                                       | -2.0713<br>(0.00) | -4.6474<br>(0.00) | ΔDLEMS                    | 0.9153<br>(0.00) | 2.9475<br>(0.01)  |
| DLINT                                        | 0.2642<br>(0.00)  | 2.5082<br>(0.03)  | CointEq                   | -2.0713(0.00)    | -5.0370<br>(0.00) |

SÜRDÜRÜLEBİLİR DİJİTALLEŞMENİN MALİ BOYUTU:  
FIRSATLAR VE TEHDİTLER

**Tablo 5: Model 3**

|                                              |                   |                   |                           |                   |                    |
|----------------------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|--------------------|
| Eşbütünleşme Analizi<br>Model 3<br>ARDL(3,0) |                   | F İstatistiği     | %95 Altsınır %95 Üstsınır |                   |                    |
|                                              |                   | 8.09              | 3.02 – 4.18               |                   |                    |
| Uzun Dönem                                   |                   |                   | Kısa Dönem                |                   |                    |
| Değişken                                     | Katsayı           | T İstatistiği     | Değişken                  | Katsayı           | T İstatistiği      |
| ΔDLEMS                                       | -1.8165<br>(0.00) | -4.6430<br>(0.00) | ΔDLEMS                    | 0.6715(0.00)      | 2.5942<br>(0.02)   |
| DLMAO                                        | 0.3578<br>(0.00)  | 2.7692<br>(0.01)  | CointEq                   | -<br>2.0713(0.00) | -<br>5.03232(0.00) |

**Tablo 6: Tanısal Testler**

| TANISAL TESTLER |               |               |               |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|
|                 | Model 1       | Model 2       | Model 3       |
| F İstatistiği   | 6.8246        | 7.2490        | 8.0962        |
| RamseyReset     | 0.1282 (0.90) | 0.1808 (0.85) | 0.8959 (0.38) |
| BreuschGodfrey  | 1.0662 (0.38) | 0.9333 (0.42) | 0.1791 (0.83) |
| B.PaganGodfrey  | 2.0578 (0.14) | 1.8598 (0.18) | 2.9167 (0.06) |
| JarqueBera      | 0.5539        | 0.2761        | 0.5009        |

ARDL sınır testi sonuçları üç modelin tamamında %5 anlamlılık düzeyinde eşbütünleşme ilişkisinin varlığına işaret etmektedir. Model 1 için  $F=6.82$ , Model 2 için  $F=7.24$  ve Model 3 için  $F=8.09$  olup, bu değerler sınır testi kritik üst değerin üzerindedir. Bu bulgu, seriler arasında uzun dönemli bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Uzun dönem katsayıları incelendiğinde, tüm modellerde DLEMS değişkeninin pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Bu durum uzun dönemde emisyon artışlarının sistem üzerinde artırıcı bir etki yarattığını göstermektedir. Dijitalleşme göstergeleri açısından Model 1’de DLGBANT, Model 2’de DLINT ve Model 3’te DLMAO değişkenleri pozitif katsayılarla sahiptir; bu da dijitalleşme göstergelerinin uzun dönemde karbon emisyonlarını artırıcı yönde etkide bulunabileceğini göstermektedir. Kısa dönemde ΔDLEMS katsayısı üç modelde de pozitif ve anlamlı bulunmuştur. Hata düzeltme terimlerinin negatif ve istatistiksel olarak anlamlı olması ise sistemin kısa dönem şoklarından sonra uzun dönemde yeniden dengeye döndüğünü teyit etmektedir. Tanısal testler modellerin istatistiksel açıdan güvenilir olduğunu desteklemektedir. Ramsey-Reset testi modelin doğru tanımlandığını, Breusch-Godfrey testi otokorelasyon olmadığını, Breusch-Pagan-Godfrey testi ise değişen varyans sorununun bulunmadığını göstermektedir. Jarque-Bera testleri hata terimlerinin normal dağıldığını doğrulamaktadır. Bu sonuçlar genel olarak hem kısa hem uzun dönemde modellere ait katsayıların

tutarlı olduğunu ve modellerin geçerli bir yapıda olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan ARDL sınır testi sonuçları değişkenler arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisinin bulunduğunu ortaya koyduğundan, her üç model için uzun dönem katsayıları kullanılarak eşbütünleşme denklemleri oluşturulmuş ve katsayılar hem istatistiksel hem de iktisadi açıdan değerlendirilmiştir.

**Model 1:**  $LEMS_t = \beta_0 - 1.8711 EMS_t + 0.0908 GBANT_t$

Model 1’de EMS değişkeninin uzun dönem katsayısı  $-1.8711$  olup %1 düzeyinde anlamlıdır. Bu sonuç, emisyonlardaki artışın uzun dönemde sistem üzerinde azaltıcı yönde bir geri besleme etkisi yarattığını göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, emisyon seviyesi uzun dönemde kendi dengesine doğru çekilme eğilimindedir. Geniş bant kullanımını temsil eden GBANT değişkeni ise uzun dönemde pozitif katsayıya sahiptir ( $0.0908$ ) ve anlamlıdır. Bu bulgu dijital altyapı genişlemesinin elektrik talebini artırarak karbon emisyonlarını yükselttiğini göstermektedir. Özellikle telekomünikasyon ağlarının ve veri iletim kapasitesinin genişlemesi uzun dönemde çevresel baskıyı artırmaktadır.

**Model 2:**  $LEMS_t = \beta_0 - 2.0713 EMS_t + 0.2642 INT_t$

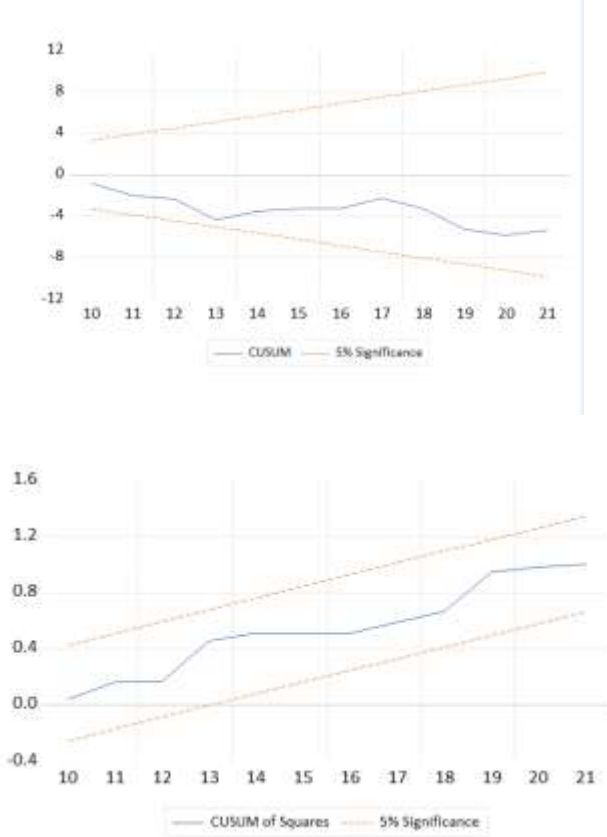
Model 2’de EMS katsayısının  $-2.0713$  ile negatif ve oldukça yüksek mutlak değere sahip olması, emisyon şoklarının uzun dönemde güçlü bir şekilde giderildiğini ve sistemin uzun dönem dengesine geri dönme eğiliminin kuvvetli olduğunu göstermektedir. İnternet kullanımını gösteren INT değişkeni pozitif ve anlamlıdır ( $0.2642$ ). Bu sonuç, internet kullanımındaki artışın uzun dönemde enerji tüketimini artırarak karbon emisyonlarını yükselttiğini ifade etmektedir. İnternet tabanlı hizmetlerin ve dijital tüketimin yaygınlaşması enerji talebini genişlettiği için çevresel baskı uzun vadede artmaktadır.

**Model 3:**  $LEMS_t = \beta_0 - 1.8165 EMS_t + 0.3578 MAO_t$

Model 3’te de EMS katsayısı negatif ( $-1.8165$ ) ve anlamlıdır. Bu, diğer modellerle tutarlı şekilde emisyon artışlarının uzun dönemde azaltıcı bir mekanizma tarafından dengelendiğini göstermektedir. Mobil abone oranını temsil eden MAO değişkeni ise uzun dönemde pozitif ve anlamlıdır ( $0.3578$ ). Bu bulgu mobil veri tüketiminin, baz istasyonlarının enerji ihtiyacının ve mobil cihaz kullanımının artmasıyla birlikte karbon emisyonlarını yükselttiğini göstermektedir. Dijitalleşmenin mobil tabanlı biçiminin uzun dönem çevresel baskıları artırdığı anlaşılmaktadır.

Sırasıyla gösterilen üç modelin tamamında EMS değişkeninin uzun dönem katsayılarının negatif ve anlamlı olması, emisyon artışlarının uzun dönemde sistem tarafından dengelendiğine işaret etmektedir. Buna karşılık dijitalleşmeyi temsil eden GBANT, INT ve MAO değişkenlerinin uzun dönemde pozitif katsayılara sahip olması, dijitalleşmenin mevcut aşamada enerji talebini artırarak CO<sub>2</sub> emisyonlarını yükselttiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, dijital altyapı yatırımlarının ve dijital hizmet talebinin artmasının çevresel etkilerinin dikkatle yönetilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

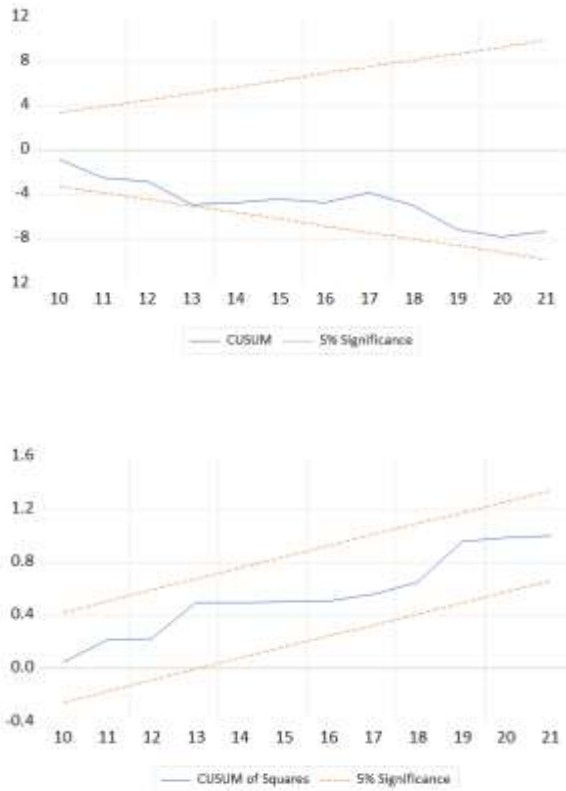
*Şekil 2. Model 1 Cusum ve Cusum Square Test Sonuçları*



CUSUM ve CUSUM of Squares test grafiklerine birlikte bakıldığında, modellerin parametre istikrarının genel olarak korunduğu görülmektedir. İlk grafikteki CUSUM çizgisi %5 anlamlılık sınırları içinde kalmakta ve herhangi bir yapısal kırılmaya işaret etmemektedir. İkinci grafikteki CUSUM

of Squares testi de benzer şekilde %5 kritik sınırların dışına çıkmamış, yalnızca dönem sonunda sınırlara yaklaşıp da istikrarı bozan bir sapma göstermemiştir. Dolayısıyla, her iki testin birlikte değerlendirilmesi, modelin parametrelerinin hem kısa hem uzun dönemde istikrarlı olduğunu ve elde edilen ARDL sonuçlarının güvenilir bir şekilde yorumlanabileceğini ortaya koymaktadır.

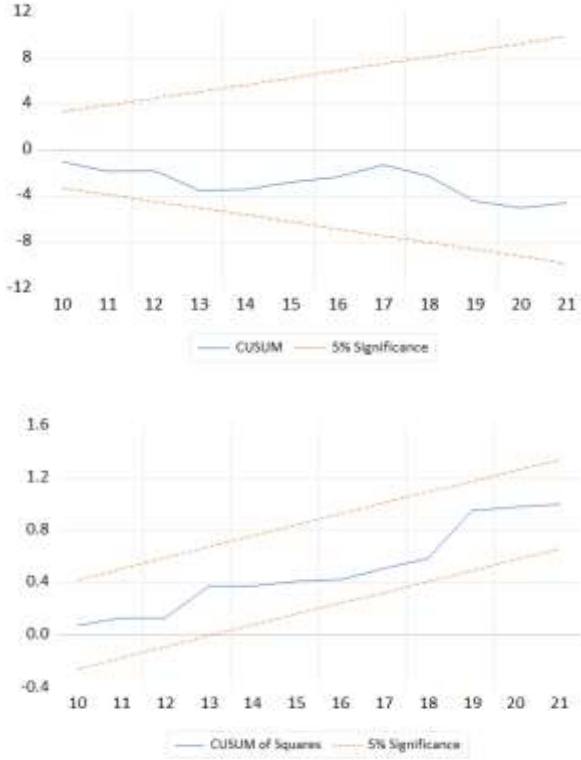
*Şekil 3. Model 2 Cusum ve Cusum Square Test Sonuçları*



CUSUM testi sonuçlarına göre modelin parametre istikrarı %5 anlamlılık sınırları içerisinde kalmış olup, zaman boyunca önemli bir sapma görülmemektedir. Bu durum modelin genel yapısında herhangi bir bozulma olmadığını göstermektedir. CUSUM of Squares testi ise parametrelerin kareler toplamına dayalı daha güçlü bir kontrol sağlamak ve sonuçlar %5 güven sınırları içinde kalmaktadır. Her ne kadar dönem sonuna doğru kritik

sınırlara yaklaşıp da, çizgi sınırları aşmamıştır. Dolayısıyla her iki testin birlikte değerlendirilmesi, modelin parametrelerinin hem kısa hem uzun vadede istikrarlı olduğunu ve tahmin edilen sonuçların güvenilirliğini desteklediğini ortaya koymaktadır.

*Şekil 4. Model 3 Cusum ve Cusum Square Test Sonuçları*



CUSUM testi grafiğinde görüldüğü üzere, tahmin edilen parametreler %5 anlamlılık sınırları içerisinde kalmış ve dönem boyunca herhangi bir yapısal kırılma ya da model istikrarsızlığına işaret eden bir sapma gözlenmemiştir. Bu durum modelin parametrelerinin genel olarak güvenilir olduğunu göstermektedir. CUSUM of Squares testi ise parametrelerin kareler toplamı üzerinden daha katı bir istikrar kontrolü sunmakta ve çizgi, özellikle dönem sonlarında üst sınırı yaklaşıp da sınırları aşmamıştır. Dolayısıyla her iki testin birlikte değerlendirilmesi, modelde yapısal bir bozulma olmadığına, parametrelerin hem kısa hem uzun dönemde istikrarlı olduğuna ve elde edilen sonuçların güvenilirliğine işaret etmektedir.

## 4. SONUÇ

Bu çalışma, 2000–2021 dönemi Türkiye verilerini kullanarak dijitalleşmenin karbon emisyonları üzerindeki etkisini ARDL sınır testi yaklaşımıyla incelemiştir. ADF ve KPSS birim kök testlerinden elde edilen bulgular, serilerin farklı bütünleşme derecelerine sahip olduğunu ortaya koymuş ve bu nedenle ARDL yönteminin kullanılması uygun bulunmuştur. Sınır testi sonuçları, üç modelin tamamında F-istatistiğinin ilgili üst sınır kritik değerlerini aşmasıyla değişkenler arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisinin varlığına işaret etmiştir. Bu durum, dijitalleşme göstergeleri ile karbon emisyonları arasında uzun dönemli bir denge ilişkisinin bulunduğunu teknik olarak teyit etmektedir. Uzun dönem katsayıları değerlendirildiğinde, her üç modelde de dijitalleşmeyi temsilen kullanılan GBANT, INT ve MAO değişkenlerinin pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Bu sonuç, ARDL'nin uzun dönem tahminlerinden elde edilen kanıtlarla dijitalleşmenin uzun dönemde CO<sub>2</sub> emisyonlarını artırıcı yönde etkide bulunduğunu göstermektedir. Eşbütünleşme denklemlerinde yer alan emisyon katsayısının negatif ve anlamlı olması ise sistemin uzun dönemde kendi dengesine dönme eğiliminde olduğunu, yani çevresel baskı karşısında bir geri besleme mekanizmasının bulunduğunu göstermektedir. Kısa dönem katsayıları da uzun dönem bulgularıyla uyumludur:  $\Delta$ DLEMS değişkeninin pozitif ve anlamlı bulunması, kısa vadede emisyon artışlarının çevresel baskıyı doğrudan yükselttiğini ortaya koymaktadır. Hata düzeltme terimlerinin negatif ve istatistiksel olarak anlamlı olması ise yaşanan kısa dönem şoklarının uzun dönemde ortadan kalktığını ve sistemin dengeye geri döndüğünü doğrulamaktadır. Bu bulgu, ARDL modellerinin temel varsayımlarından biri olan uzun dönem istikrarlı ilişkiyi teknik olarak desteklemektedir. Tanısal testlerden elde edilen sonuçlar, kurulan ARDL modellerinin ekonometrik açıdan geçerli ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Ramsey-RESET testinin modelin doğru biçimde tanımlandığını, Breusch-Godfrey testinin otokorelasyon olmadığını ve Breusch-Pagan-Godfrey testinin değişen varyans bulunmadığını göstermesi, modellerin yapısal olarak sağlam olduğunu teyit etmektedir. Jarque-Bera test sonuçları ise hata terimlerinin normal dağıldığını ortaya koyarak tahmin edilen modellerin güvenilirliğini artırmaktadır. Dolayısıyla bulgular hem kısa

hem uzun dönem dinamiklerinin tutarlı olduğunu ve ARDL yönteminin bu çalışma için uygun bir yöntemsel çerçeve sunduğunu göstermektedir. Elde edilen ampirik sonuçlar, Türkiye’de dijitalleşmenin mevcut altyapı koşulları, enerji yapısı ve teknoloji kullanım biçimi nedeniyle emisyonları artırıcı etkide bulunduğunu göstermektedir. Bu yönüyle Tunalı (2016), Park et al. (2018) ve Khan et al. (2018) gibi dijitalleşmenin çevresel etkilerini artırıcı yönde tespit eden çalışmalarla uyumludur. Bununla birlikte literatürde dijitalleşmenin enerji verimliliğini artırarak emisyonu azaltabildiğini gösteren çalışmalar (Ishida, 2015; Haseeb et al., 2019) da mevcuttur. Bu farklılık, ülkelerin enerji arz yapısı, yenilenebilir enerji payı ve dijital altyapılarının enerji verimliliği seviyeleriyle açıklanabilir. Sonuç olarak, ARDL yaklaşımından elde edilen bulgular dijitalleşmenin Türkiye için hem kısa hem uzun dönemde karbon emisyonlarını artırdığını teknik olarak ortaya koymaktadır. Ancak uygun politika setleri dijitalleşmenin enerji yoğunluğunu azaltabilir. Veri merkezlerinin yenilenebilir enerjiyle çalıştırılması, enerji verimli dijital cihazların teşvik edilmesi, akıllı şebeke ve akıllı şehir uygulamalarının yaygınlaştırılması, dijitalleşmenin çevresel maliyetlerini düşürmede kritik öneme sahiptir. Ayrıca dijital kamu hizmetlerinin düşük karbon stratejileriyle uyumlu biçimde geliştirilmesi, dijitalleşmenin ekonomik ve sosyal faydalarını korurken çevresel etkilerini azaltabilir. Bu çalışma, dijitalleşme politikalarının sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu olarak şekillendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- Al Qudah, A. M., Zouaoui, H., & Aboelsoud, M. E. (2020). The asymmetric impact of financial development on energy consumption in Jordan: Evidence from nonlinear ARDL approach. *Energy Reports*, 6, 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.040>
- Ali, S., Ullah, S., & Khan, M. I. (2020). Does foreign aid reduce poverty? A nonlinear ARDL analysis. *Heliyon*, 6(3), e03515. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03515>
- Al-Mulali, U., Solarin, S. A., & Ozturk, I. (2016). Investigating the environmental Kuznets curve hypothesis in seven regions: The role of renewable energy. *Ecological Indicators*, 67, 267–282. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.059>
- Annarelli, A., Battistella, C., Nonino, F., Parida, V., & Pessot, E. (2021). Literature review on digitalization capabilities: Co-citation analysis of antecedents, conceptualization and consequences. *Technological Forecasting and Social Change*, 166, 120635. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120635>
- Brenner, B., & Hartl, B. (2021). The perceived relationship between digitalization and ecological, economic, and social sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128128>
- Cho, Y., Lee, J., & Kim, T. (2007). The impact of ICT investment and energy price on industrial electricity demand: Dynamic growth model approach. *Energy Policy*, 35(9), 4730–4738. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.03.030>
- Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1981). Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica*, 49(4), 1057–1072.
- Engle, R. F., & Granger, C. W. J. (1987). Co-integration and error correction: Representation, estimation, and testing. *Econometrica*, 55(2), 251–276. <https://doi.org/10.2307/1913236>
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- Guo, J., Wang, L., Zhou, W. J., & Wei, C. (2022). Powering green digitalization: Evidence from 5G network infrastructure in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106286. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106286>

- Haseeb, M., Kot, S., Hussain, H. I., & Jermisittiparsert, K. (2019). Impact of economic growth, environmental pollution, and energy consumption on health expenditure and R&D expenditure of ASEAN countries. *Energies*, 12(19), Article 3629. <https://doi.org/10.3390/en12193629>
- Ishida, H. (2015). The effect of ICT development on economic growth and energy consumption in Japan. *Telecommunications Policy*, 39(9), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2015.02.002>
- Johansen, S. (1988). Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 12(2–3), 231–254. [https://doi.org/10.1016/0165-1889\(88\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0165-1889(88)90041-3)
- Johansen, S., & Juselius, K. (1990). Maximum likelihood estimation and inference on cointegration—with applications to the demand for money. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 52(2), 169–210. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.1990.mp52002003.x>
- Karanfil, M., Uzma, O., Dalgacı, B. B., & Erden, D. (2024). Dijitalleşme ve inovasyonun karbon ayak izine etkisi: Seçilmiş OECD ülkeleri için panel veri analizi. *Biga İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 5(3), 203–215. <https://doi.org/10.70754/biibfd.1526606>
- Khan, M. K., Teng, J. Z., Khan, M. I., & Khan, M. O. (2018). Impact of globalization, economic growth and ICT on CO<sub>2</sub> emissions in Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(24), 24067–24082. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2435-x>
- Kohtamäki, M., Parida, V., Oghazi, P., Gebauer, H., & Baines, T. (2019). Digital servitization business models in ecosystems: A theory of the firm. *Journal of Business Research*, 104, 380–392. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.06.027>
- Kurniawan, T. A., Maiurova, A., Kustikova, M., Bykovskaia, E., Othman, M. H. D., & Goh, H. H. (2022). Accelerating sustainability transition in St. Petersburg (Russia) through digitalization-based circular economy in waste recycling industry: A strategy to promote carbon neutrality in era of industry 4.0. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132452. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132452>
- Kwiatkowski, D., Phillips, P. C. B., Schmidt, P., & Shin, Y. (1992). Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. *Journal of Econometrics*, 54(1–3), 159–178. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(92\)90104-Y](https://doi.org/10.1016/0304-4076(92)90104-Y)
- Lee, J. W., & Brahmasrene, T. (2014). ICT, CO<sub>2</sub> emissions and economic growth: Evidence from a panel of ASEAN. *Global Economic Review*, 43(2), 93–109. <https://doi.org/10.1080/1226508X.2014.917803>

- Lin, B. Q., & Huang, C. C. (2023). How will promoting the digital economy affect electricity intensity? *Energy Policy*, 173, 113341. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113341>
- Lin, B. Q., & Zhou, Y. C. (2021). Does the internet development affect energy and carbon emission performance? *Sustainable Production and Consumption*, 28, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.016>
- Ma, D., & Zhu, Q. (2022). Innovation in emerging economies: Research on the digital economy driving high-quality green development. *Journal of Business Research*, 145, 801–813. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.03.041>
- Mah, J. S. (2000). An empirical examination of the disaggregated import demand of Korea: The case of sectoral imports. *Journal of Asian Economics*, 11(2), 237–244. [https://doi.org/10.1016/S1049-0078\(00\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S1049-0078(00)00051-3)
- Miao, Z., Guo, A. D., Chen, X. D., & Zhu, P. Y. (2022). Network technology, whole-process performance, and variable-specific decomposition analysis: Solutions for energy-economy-environment nexus. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1–18. <https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3165146>
- Miao, Z., Zhang, Y. C., Liu, S. C., Chen, X. D., & Baležentis, T. (2022). Heterogeneous strategy and performance decomposition: Energy-economy-environment nexus in the light of natural & managerial disposability. *Environmental Impact Assessment Review*, 95, 106777. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106777>
- Narayan, P. K., & Smyth, R. (2005). Trade liberalization and economic growth in Fiji: An empirical assessment using the ARDL approach. *Journal of the Asia Pacific Economy*, 10(1), 96–115. <https://doi.org/10.1080/1354786042000309099>
- Park, C., Meng, F., & Baloch, M. A. (2018). The effect of ICT on energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions: A case study of South Korea. *Sustainability*, 10(10), Article 3825. <https://doi.org/10.3390/su10103825>
- Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. J. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, 16(3), 289–326. <https://doi.org/10.1002/jae.616>
- Rachinger, M., Rauter, R., Müller, C., Vorraber, W., & Schirgi, E. (2019). Digitalization and its influence on business model innovation. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(8), 1143–1160. <https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2018-0020>

- Rowan, N. J., Murray, N., Qiao, Y. S., O'Neill, E., Clifford, E., Barceló, D., & Power, D. M. (2022). Digital transformation of peatland eco-innovations ('Paludiculture'): Enabling a paradigm shift towards the real-time sustainable production of 'green-friendly' products and services. *Science of the Total Environment*, 838, 156328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156328>
- Sadorsky, P. (2012). Information communication technology and electricity consumption in emerging economies. *Energy Policy*, 48, 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.064>
- Salahuddin, M., & Alam, K. (2016). Information and communication technology, electricity consumption and economic growth in OECD countries: A panel data analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 76, 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.005>
- Sharifi-Renani, H. (2007). *Demand for money in Iran: An ARDL approach* (MPRA Paper No. 8224). Munich Personal RePEc Archive. <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/8224/>
- Tunali, H. (2016). The impacts of information and communication technologies on CO<sub>2</sub> emissions in Turkey. *Journal of Business, Economics and Finance*, 5(1), 73–80. <https://doi.org/10.17261/Pressacademia.2016116558>
- Wang, J. Q., Ma, X. W., Zhang, J., & Zhao, X. (2022). Impacts of digital technology on energy sustainability: China case study. *Applied Energy*, 323, 119329. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119329>
- Wang, Y. F., Li, J., Zhao, Z. H., Ren, J., & Chen, X. R. (2023). Research on carbon emission reduction effect of China's regional digital trade under the "double carbon" target: Combination of the regulatory role of industrial agglomeration and carbon emissions trading mechanism. *Journal of Cleaner Production*, 405, 137049. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137049>
- Xu, Q., Zhong, M. R., & Li, X. (2022). How does digitalization affect energy? International evidence. *Energy Economics*, 107, 105879. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105879>
- Yıldırım, D., & Yıldırım, S. (2024). The impact of digital economies on carbon emissions and economic growth in Türkiye: Evidence from the FA-ARDL. *Kent Akademisi*, 17(2), 407–426. <https://doi.org/10.35674/kent.1597167>
- You, J. M., & Zhang, W. (2022). How heterogeneous technological progress promotes industrial structure upgrading and industrial carbon efficiency? Evidence from China's industries. *Energy*, 247, 123386. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123386>

- Zhang, H. Y., Gao, S. Z., & Zhou, P. (2023). Role of digitalization in energy storage technological innovation: Evidence from China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 171, 113014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113014>
- Zheng, R., Wu, G., Cheng, Y., Liu, H., Wang, Y., & Wang, X. (2023). How does digitalization drive carbon emissions? The inverted U-shaped effect in China. *Environmental Impact Assessment Review*, 102, 107203. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107203>