

BÖLÜM 3

ENDÜSTRİ 4.0 KAPSAMINDA TEKNOLOJİK YENİLİKLERİN VE EKONOMİK BÜYÜMENİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇEVRE ÜZERİNDEKİ ETKİSİ: G20 ÜLKELERİNDEN KANITLAR

Şahin BULUT¹, Şule UYAR²

1 Doç. Dr., İktisat Bölümü, Siyasal Bilgiler Fakültesi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın, Türkiye. E-posta: sbulut@adu.edu.tr, sahinnbulut@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3462-6381>

2 Doktora Öğrencisi, Maliye ve Vergi Uygulamaları Bölümü, Siyasal Bilgiler Fakültesi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın, Türkiye. E-posta: sule.uyar90@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4142-6994>

Bu çalışmanın kısa özeti 27 Nisan 2023- 29 Nisan 2023 tarihleri arasında Eskişehir’de gerçekleştirilen “Uluslararası Katılımlı Ekonomi Araştırmaları ve Finansal Piyasalar Kongresi (IERFM)” adlı kongrede sunulmuştur.



Lisans: Creative Commons Atf–Ticari Olmayan–Türetilemez 4.0 Uluslararası / (*License:* *Creative Commons Attribution–NonCommercial–NoDerivatives 4.0 International*) (CC BY-NC-ND 4.0).

Açık Erişim / Open Access.

DOI (kitap): <https://doi.org/10.63127/tuaz.nd.29>

Tavsiye Edilen Atf / Recommended Citation:

Bulut, Ş., & Uyar, Ş. (2025). Endüstri 4.0 kapsamında teknolojik yeniliklerin ve ekonomik büyümenin sürdürülebilir çevre üzerindeki etkisi: G20 ülkelerinden kanıtlar. In Ş. Bulut (Ed.), *İktisadi perspektiften sosyal bilimlerde güncel çalışmalar: Kuramsal ve uygulamalı incelemeler* (ss. 41-74). Turkuaz Yayınları. <https://doi.org/10.63127/tuaz.nd.29.c125>

Özet

Endüstri 4.0 kapsamında yeni üretim sistemleri ve teknolojileri birçok avantaj sunmasına rağmen, üretimde kullanılan hammadde, enerji ve doğal kaynak tüketimindeki artış çevre sorunlarına neden olmaya devam etmektedir. Ülkeler ise hem ekonomik olarak büyümek hem de teknolojik gelişmelerini sürdürmek istemektedirler. Bu çalışmanın amacı, seçilmiş 16 G20 ülkesi için 2000-2020 dönemi verileri kullanılarak, Endüstri 4.0 bağlamında teknolojik yeniliklerin ve ekonomik büyümenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Çalışmada; teknolojik yenilikleri temsilen bilgi ve iletişim teknolojileri (BİT) ihracatı, çevresel sürdürülebilirliği temsilen karbondioksit (CO₂) emisyonu ve ekonomik büyümeyi temsilen reel gayrisafi yurt içi hasıla (rGSYİH) verileri kullanılmıştır. Panel veri analizinden elde edilen bulgular, uzun dönemde BİT ihracatı ile CO₂ emisyonları arasında negatif bir ilişki olduğunu; buna karşılık ekonomik büyüme ile CO₂ emisyonları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmadığını göstermektedir. Sonuçlar, teknolojik yeniliklerin CO₂ emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasına olumlu katkıda bulunabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, Çevre, Ekonomik Büyüme, Sürdürülebilirlik, Panel Veri.

JEL Kodları: C33, L60, Q33.

THE IMPACT OF TECHNOLOGICAL INNOVATIONS AND ECONOMIC GROWTH ON ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0: EVIDENCE FROM G20 COUNTRIES

Abstract

Although new production systems and technologies within the scope of Industry 4.0 offer many advantages, the increase in the consumption of raw materials, energy, and natural resources used in production continues to cause environmental problems. Meanwhile, countries aim to achieve both economic growth and continued technological development. The aim of this study is to examine the impact of technological innovations and economic growth on environmental sustainability within the context of Industry 4.0, using data from 16 selected G20 countries for the period 2000–2020. In the study, information and communication technology (ICT) exports are used to

represent technological innovations, carbon dioxide (CO₂) emissions to represent environmental sustainability, and real gross domestic product (rGDP) to represent economic growth. Findings obtained from panel data analysis indicate a negative relationship between ICT exports and CO₂ emissions in the long run, whereas no statistically significant relationship was found between economic growth and CO₂ emissions. These results suggest that technological innovations can contribute positively to ensuring environmental sustainability by reducing CO₂ emissions.

Keywords: Industry 4.0, Environment, Economic Growth, Sustainability, Panel Data.

JEL Codes: C33, L60, Q33.

1. GİRİŞ

Tüm dünyada sanayileşme ve nüfus artışı; kömür, doğalgaz ve petrol gibi fosil yakıtlı enerji tüketiminin artmasına yol açmaktadır. Buna bağlı olarak enerji fiyatları yükselmekte, çevre daha fazla kirlenmekte ve karbondioksit (CO₂) emisyonlarında meydana gelen artış iklim değişikliğine neden olmaktadır (Busu, 2020). Küresel ısınmanın ve iklim değişikliğinin temel sebebi olarak kabul edilen CO₂ emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliği sağlamak küresel bir endişe haline gelmiştir (Raihan ve Tuspekova, 2022).

Küresel iklim değişikliği ile mücadele etmek için birçok örgüt ve kuruluş tarafından çalışmalar yapılmış, çevre kirliliğine neden olan emisyonları azaltmak için uluslararası politikalar benimsenmeye çalışılmıştır. 1992 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), 1997'de Kyoto Protokolü, 2009'da Kopenhag Anlaşması ve 2015'te Paris Anlaşması gibi çok sayıda küresel anlaşma yürürlüğe girmiştir (Khan ve Ximei, 2022: 2). 2015 yılında Birleşmiş Milletler (BM) genel kurulunun açıkladığı “2030 Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi” insanlar, gezegen, barış ve refah için küresel ortak bir eylem planı olarak tanıtılmıştır. Bu planının merkezinde, gelişmiş ve gelişmekte olan tüm ülkeler tarafından küresel bir ortaklık içinde acil eylem çağrısı olan 17 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi (SKH) yer almaktadır. İklim değişikliği ve etkileriyle mücadele etmek SKH'nın 13. hedefi arasında bulunmaktadır (BM, 2015).

Emisyonları azaltmanın önemi evrensel olarak kabul edilse de, ülkeler iklim değişikliğinin yol açtığı problemlerle başa çıkmak için ne kadar sorumluluk üstlenmeleri gerektiği hususunda hem fikir olamamışlardır. Bu tutarsızlık gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasındaki çatışmalara da yansımaktadır (Yan vd., 2022: 1). Rusya-Ukrayna savaşı nedeniyle ortaya çıkan enerji krizi bu çatışmaların en önemli göstergelerinden biridir (Ünlü vd., 2022: 2). Ülkeler iklim değişikliğiyle mücadele etmek için etkili politikalar geliştirmezlerse, 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarının yaklaşık %52 oranında artacağı tahmin edilmektedir (Dogan ve Pata, 2022).

Bu çalışmada Endüstri 4.0'ın uygulanması sürecinde teknolojik yenilikler sürdürülebilirlik kavramıyla birleştirilerek, teknolojik yeniliklerin ve ekonomik büyümenin çevresel boyutunun araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla 2000-2020 dönemi veri alınarak 16 tane G20 ülkesinde teknolojik

yeniliklerin ve ekonomik büyümenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi panel veri analizi ile test edilmiştir. Çalışmanın analizinde, teknolojik yenilikleri açıklamak için BİT ihracatı verisi kullanılırken, ekonomik büyümeyi temsil etmek için reel GSYİH verisi ve çevresel sürdürülebilirliği temsil etmek için CO₂ emisyonları verisi kullanılmıştır.

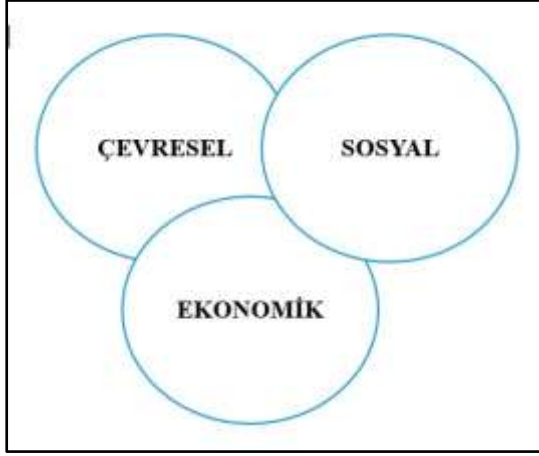
2. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK, ENDÜSTRİ 4.0 VE CO₂

Sürdürülebilirlik kavramı ilk kez Birleşmiş Milletler Dünya Çerçeve ve Kalkınma Komisyonu (WCED) tarafından 1987 yılında yayınlanan rapor aracılığıyla tanıtılmıştır. Bu raporda sürdürülebilirlik *“insanlık, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden, bugünün ihtiyaçlarını karşılamak için kalkınmayı sürdürülebilir kılma yeteneğine sahiptir”* şeklinde tanımlanmıştır (BM, 1987).

Sürdürülebilirlik, çevresel, sosyal ve ekonomik boyutları olan bir kavramdır (Elkington, 1998). Elkington (1998: 37) sürdürülebilirliğin çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlarını birbiriyle ilgili olarak ele alan üçlü sonuç çizgisi (TBL) kavramını ilk kez tanımlamıştır. Çevresel sürdürülebilirlik doğadaki kaynakların tüketimiyle yenilenmesi arasındaki ilişkiye odaklanmaktadır (Glavic ve Lukman, 2007: 1976). Kuruluşlar söz konusu olduğunda bu boyut, üretim süreçlerinde kullanılan ham madde ve kaynakların geri dönüşümü ve yenilenmesi gibi döngüsel bir ekonomi sisteminin benimsenmesi yoluyla mümkündür (Braccini, 2019: 3).

Sosyal sürdürülebilirlik, tüm coğrafi alanlarda sosyal eşitliğin sağlandığı; herkesin barınma, kamu hizmetleri, eğitim, ulaşım ve eğitim gibi temel hizmetlere adil erişim sağladığı toplumların oluşturulmasıdır (Dempsey vd., 2011: 292-295). Ekonomik sürdürülebilirlik, uzun vadede ekonomik büyüme sağlanırken çevresel ve sosyal kaynakların göz ardı edilmemesi ile ilgilidir. Ekonomik sermaye büyürken, doğal kaynaklar, ekosistemler, sosyal refah ve servet dağılımında dengenin sağlanması gerekmektedir (Choi ve Ng, 2011: 275; Ghobakhloo, 2020).

Şekil 1. Sürdürülebilirliğin üç boyutu.



Kaynak: Elkington, 1998.

Endüstri 4.0 olarak adlandırılan dördüncü sanayi devrimi, 2011 yılında Almanya Hükümeti tarafından ilk kez Hannover Fuarında gündeme getirilmiş olup, bilgi ve iletişim teknolojilerindeki ilerlemelerin üretim süreçlerinde yeni bir devrim yaratarak, sanayiye daha ileri bir aşamaya taşıyacağı ilk defa bu platformda ifade edilmiştir (Ege Bölgesi Sanayi Odası (EBSO), 2015; Akçacı ve Bulut, 2017:54) Endüstri 4.0 kavramı ile endüstrinin dijital dönüşümüne tanıklık eden dünya ekonomileri; toplumsal, endüstriyel ve teknolojik değişimlerle karşı karşıya kalmışlardır. Dördüncü sanayi devrimine kadar insanlık tarihi üç endüstriyel devrim geçirmiştir. 18'inci yüzyılın ikinci yarısında mekanik üretim tesislerinin faaliyete geçmesi birinci sanayi devriminin başlangıcı sayılmıştır. 1870'li yıllarda elektrifikasyon ve üretimde işbölümünün yaygınlaşması ikinci sanayi devriminin başlamasına neden olmuştur. Dijital devrim olarak adlandırılan üçüncü sanayi devrimi ise 1970'lerde başlamış, gelişmiş elektronik, bilgi teknolojilerinin ve bilgisayarların kullanılmasıyla üretim süreçlerinde otomasyon sağlanmıştır (Hermann vd., 2016).

Endüstri 4.0, genel olarak kendisinden önceki üç endüstri devrimini temelden dönüştüren bir devrim olarak görülmektedir. İlk üç endüstri devriminin temel aldığı mekanizasyon, elektrik ve bilgi ve iletişim teknolojileri gibi teknolojilere dayalı üretim konsepti, Endüstri 4.0'da akıllı, bağlı ve merkezilikten uzak bir üretim konseptine evrilmiştir (Karre vd., 2017: 209). Endüstri 4.0 çok sayıda bilgi iletişim teknolojilerinin fabrikalara uyarlanmış halidir. Endüstri 4.0 mevcut üretim sistemlerinin akıllı üretim

teknolojileriyle birleştirilerek, insan kontrolüne gerek kalmadan makineler ile ürünlerin iletişime geçtiği bir üretim ağı konsepti olarak tanımlanmaktadır (Indri vd., 2018: 1679). Endüstri 4.0'ın yaygınlaşmasıyla birlikte ürün ve hizmet üretiminde nesnelerin interneti, siber fiziksel sistemler, bulut bilişim sistemleri ve üç boyutlu baskı gibi ileri teknolojiler kullanılmaya başlanmış; akıllı üretim, akıllı ürünler, akıllı şehirler ve dijital sürdürülebilirlik gibi kavramları gündelik hayatın pratikleri haline gelmiştir (Roblek vd., 2016: 4).

Sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma sürecinde, endüstri 4.0'ın uygulanmasının çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan katkıları araştırma konusu olarak incelenmektedir. Bazı araştırmalar Endüstri 4.0'ın uygulanması sürecinde teknolojik yeniliklerin, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri üzerinde olumlu katkısının olduğunu göstermektedir (Ferreira vd., 2023; Ghobakhloo, 2020; Jayashree vd., 2021).

Sürdürülebilirliği sağlama hedefinde Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanması döngüsel ürünlerin üretimini artıracak, üretim için ihtiyaç duyulan enerji miktarını azaltacaktır. Üretim süreçlerinde zamanla daha az atık üretilmesi düşük karbonlu bir geleceğin gerçekleşmesine katkıda bulunarak çevresel sürdürülebilirlik sağlanabilecektir (Ferreira vd., 2023). Üç boyutlu baskı, nesnelerin interneti ve bulut bilişim sistemleri gibi teknolojilerin üretimde kullanılması sonucu hammadde kullanımı ve hatalı üretim miktarı azalacak, düşük maliyetle daha kaliteli ürünler üretilerek üretimde verimlilik sağlanacak ve ekonomik büyüme teşvik edilecektir. Çokuluslu şirketlerin yeni teknolojilere yönelik küresel alanda yapacakları yatırımlarla ekonomik büyüme hız kazanacaktır. Endüstri 4.0'ın uygulanmasının birtakım zorlukları da bulunmaktadır. Yeni teknolojilerin ortaya çıkmasıyla birlikte işgücü profilinin zamanla değişmesi beklenmektedir. Yazılım geliştirme ve BİT teknolojilerinde yetkinliğe sahip teknolojiden anlayan genç işgücüne olan talebin artmasıyla, az nitelikli işçilerin yerini yazılım becerilerine sahip işçiler alacaktır. Bu nedenle gelecekteki işgücünü gelişen teknolojiler ile ilgili becerilere hazırlamak, yeni gelişen iş kollarında istihdam edebilmek ve bu alanda yeteneklerini artırmak için mesleki eğitimlerle desteklemek gerekecektir (Rüßmann vd., 2015).

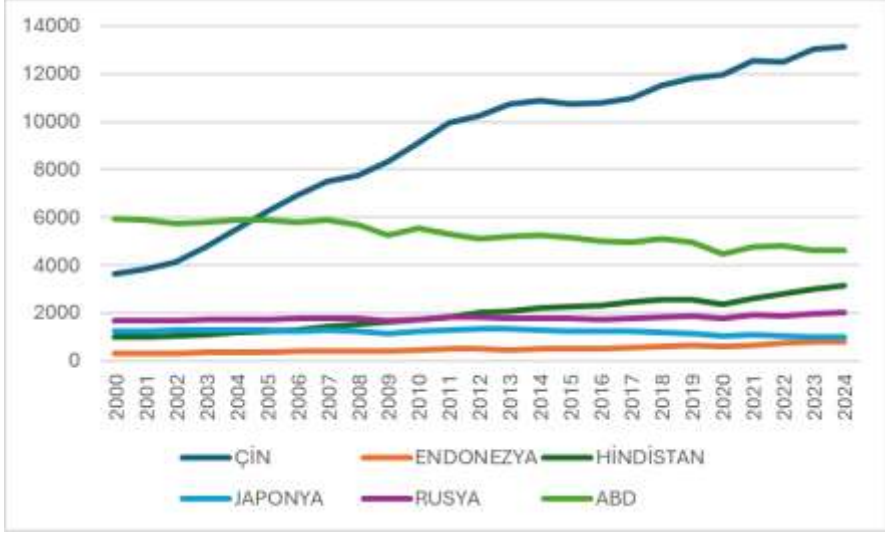
BİT sektörünün karbondioksit emisyonlarını azaltmadaki önemi son yıllardaki çalışmalarda aktif olarak tartışılmaktadır (Kim, 2022). Küresel e-Sürdürülebilirlik Girişim raporu (GeSI) BİT endüstrisinin düşük karbonlu bir ekonomi yaratmaya önemli katkıda bulunabileceğini ileri sürmüştür (GeSI,

2008). BİT'in daha akıllı şehirler, ulaşım sistemleri, endüstriyel süreçler ve enerji tasarrufu kazanımları geliştirerek küresel ölçekte karbondioksit emisyonlarını azaltması beklenmektedir (Higon vd., 2017). Diğer yandan internet, cep telefonu ve bilgisayarların kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte enerji talebinde meydana gelen artış, BİT ile ilgili materyallerin daha fazla üretimine yol açtığı için çevresel bozulmayı artırabilir (Khan, 2022).

BİT endüstrisi, iletişim kurma ve çalışma şekillerini önemli ölçüde değiştirmiştir. Özellikle COVID 19 salgını döneminde; e-ticaret, çevrimiçi çalışma ve eğitim süreçleri, sanal toplantılar, dünya çapında hem insanların ulaşım masraflarını hem de malların taşınmasına ilişkin maliyetleri azaltmış ve fiziksel varlıkların kullanımını önemli ölçüde düşürmüştür. Buna paralel olarak petrol tüketimi ve karbon emisyonları da azalmıştır. BİT insanın doğaya verdiği zararın etkisini azaltma fırsatları sunduğu için sürdürülebilirliğin sağlanmasına olumlu katkıda bulunabilir (Belkhir ve Elmeliği, 2018: 448; Huang vd., 2022).

21. Yüzyılın başından günümüze kadar 2009 küresel mali kriz ve 2020 (COVID-19) pandemi dönemi hariç tutulduğunda, gelişmekte olan ülkelerde CO₂ emisyonları düzenli bir artış göstermiştir (EDGAR, 2025). Avrupa Komisyonu'nun 2022 yılında yayınlamış olduğu rapora göre, 2020 yılında küresel fosil CO₂ emisyonları COVID-19 salgını nedeniyle 2019 yılına kıyasla %5,3 oranında azalmıştır. Ancak 2021 yılına gelindiğinde dünyada CO₂ emisyonları neredeyse 2019 yılındaki pandemi öncesi seviyelerine geri dönmüştür (EDGAR, 2022).

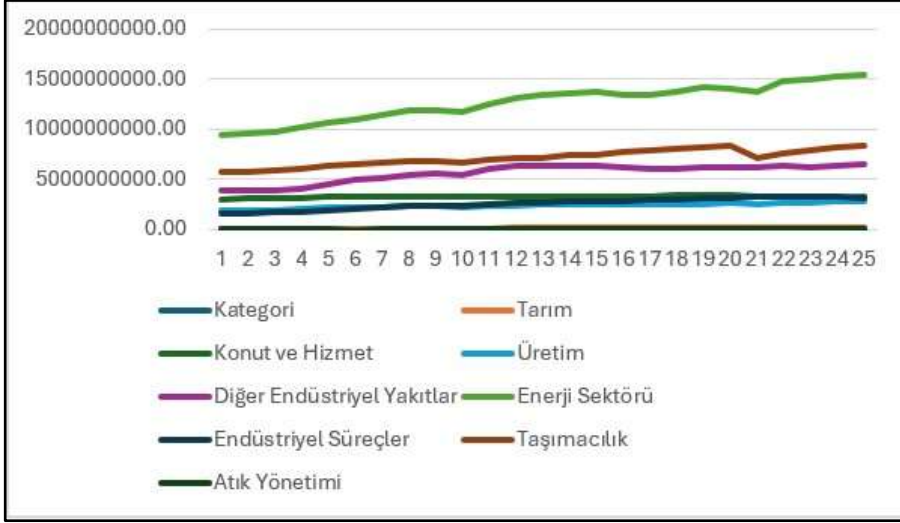
Grafik 1. Seçili Ülkelerde Toplam CO₂ Emisyonları



Kaynak: EDGAR, 2025.

G20 ülkeleri dünyanın en büyük CO₂ emisyonu yayan ülkeler arasında bulunmaktadır. G20 ülkelerinden kaynaklanan toplam CO₂ emisyonları, 2021 yılı itibariyle dünyadaki toplam küresel emisyonların yaklaşık %76'sını oluşturmaktadır (UNEP, 2024). Grafik 1'e göre 2021 yılında G20 ülkeleri içerisinde toplam CO₂ emisyonlarının en yüksek olduğu ülkeler sırasıyla Çin %12,55, ABD 4,75, Hindistan %2,59, Rusya %1,93 ile Japonya %1,80'dir. Beş ülkenin tümü 2021'de CO₂ emisyonlarını 2020 yılına kıyasla artırmıştır, en büyük artışlar %10,5 Hindistan ve %8,1 ile Rusya'dır (EDGAR, 2022). 2024 yılında hızlı büyüyen ekonomilerde emisyon artışı devam etmiştir. 2024'te dünyanın en çok emisyon salınımı yapan G20 ülkesi Çin, ABD, Hindistan, Rusya ve Endonezya'dır. 2023 yılına kıyasla 2024'te %3,9 Hindistan, %2,5 Rusya, %5 Endonezya yıllık artış göstererek emisyon artışlarının büyük bir bölümünden sorumlu tutulmuştur (EDGAR, 2025)

Grafik 2. Dünyada Sektörlere Göre CO2 Emisyonları



Kaynak: EDGAR, 2025.

Grafik 2'ye göre 2023 yılına kıyasla 2024'te en çok karbon salınımı yapan sektörler %1,5 artışla enerji sektörü ve %1,6 artışla yakıt sektörü olmuştur. Aynı zamanda üretim sektörleri (yakıt çıkarımı ve üretimi) CO₂ emisyonlarını artırırken, diğer tüm ekonomik sektörlerde CO₂ emisyonları ya artmış ya da sabit kalmıştır (Avrupa Komisyonu, 2025).

3. LİTERATÜR ÖZETİ

Son yıllarda teknolojik yenilikler, iklim değişikliğinin yarattığı zorluklara çözüm sunması ve çevresel ile ekonomik sürdürülebilirliği desteklemesi nedeniyle ekonomi literatüründe önemli bir konum kazanmıştır (Fernandez ve Lopez, 2018). Çok sayıda hükümet yetkilisi, bilim insanı ve araştırmacı çevre kalitesinin iyileştirilmesinde ve CO₂ emisyonlarının azaltılmasında teknolojik yeniliklerin etkisini araştırmaya başlamıştır (Cheng vd., 2021) Teknolojik yeniliklerin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini araştıran literatürdeki bazı araştırmalarda teknolojik yenilikler farklı göstergelerle temsil edilmektedir. Bazı araştırmalarda teknolojik yeniliklerin önemli bir göstergesi olarak Ar-Ge ve Ar-Ge'nin çıktısı olan patent değişkeni kullanılmaktadır. Bazı araştırmalarda ise ekonomik büyüme ve yenilebilir enerji tüketimi, çevre kalitesini etkileyen diğer değişkenler olarak ele

alınmaktadır. Söz konusu değişkenlerin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini inceleyen literatürdeki bazı çalışmaların özeti aşağıda sunulmuştur.

Koçak ve Ulucak (2019) 2003-2015 arası dönemde 19 yüksek gelirli OECD ülkesinde yenilenebilir enerjiye yönelik Ar-Ge harcamalarının CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini araştırmak için, öncelikle Statik panel veri analizinden sonra ise Dinamik Panel veri analizinden yararlanmıştır. Analiz sonuçlarına göre fosil enerjiye yönelik yapılan Ar-Ge harcamaları CO₂ emisyonlarını artırırken, yenilenebilir enerjiye yönelik yapılan Ar-Ge yatırımları CO₂ emisyonlarını azaltmaktadır.

Petrovic ve Lobanov (2020) 1981- 2014 yıllarını veri alarak 16 OECD ülkesinde Ar-Ge harcamaları ile CO₂ emisyonları değişkenleri için ampirik olarak incelemişler ve Panel veri analizinin uygulandığı araştırmanın bulgularına göre, uzun dönemde Ar-Ge harcamaları ile CO₂ emisyonları arasında negatif ilişki vardır ve Ar-Ge yatırımlarındaki artış CO₂ emisyonlarını azaltmaktadır. Ancak elde edilen bulgular seçili OECD ülkelerinin yaklaşık %40'ı için geçerli değildir. Ünlü vd. (2022) G8 ülkeleri için 1996-2018 arası dönemde yenilenebilir enerji tüketimi alt göstergeleri (hidroelektrik, güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi) ile CO₂ emisyonları ve Ar-Ge harcamaları arasındaki ilişkiyi panel ARDL yöntemiyle incelemişlerdir. Panel nedensellik testi bulgularına göre, CO₂ emisyonlarından Ar-Ge harcamalarına doğru %10 anlamlılık düzeyinde tek taraflı nedensellik ilişkisi olup yenilenebilir enerji tüketimi alt değişkenleri ile Ar-Ge harcamaları arasında tek yönlü bir nedensellik ilişkisi bulunmaktadır. Zhang vd. (2022) 1990-2019 arası dönemde gelişmekte olan beş ülke (Çin, Hindistan, Brezilya, Meksika ve Rusya) için yapmış oldukları çalışmada, Ar-Ge harcamalarının çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini panel veri analizi yöntemiyle araştırmışlardır. Analiz bulguları, Ar-Ge harcamalarında meydana gelen artışın çevre kalitesini düşürdüğünü ortaya koymaktadır.

Huseynli (2024) Azerbaycan ekonomisinin 1998-2022 arası dönemine ait verileri kullanarak kamu Ar-Ge harcamaları ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Granger nedensellik testi uygulanan çalışmanın bulgularına göre, kamu Ar-Ge harcamaları ile CO₂ emisyonları arasında herhangi bir nedensellik ilişkisi bulunmamaktadır. Xuan vd. (2025) 1990-2023 dönemini veri alarak ABD'de Ar-Ge yatırımı, finansal gelişme, enerji kullanımı ile çevresel bozulma arasındaki ilişkiyi ARDL yönteminden yararlanarak incelemişlerdir. Araştırma bulgularına göre, Ar-Ge

yatırımlarındaki %1’lik artış CO₂ emisyonlarını %0,45 oranında azaltmaktadır. Enerji kullanımı ve finansal gelişmedeki %1’lik artış ise CO₂ emisyonlarını sırasıyla %0,21 ve %0,55 oranında artırmaktadır. Söz konusu bulgulardan elde edilen sonuçlara göre, teknolojik yenilikler çevresel kirliliği büyük ölçüde azaltmaktadır.

Bazı araştırmalar teknolojik yenilik göstergesi olarak patent sayısı verisini kullanmışlardır. Cheng vd. (2021) 35 OECD ülkesi için 1996-2015 arası dönemde teknolojik yeniliklerin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini panel kuantil regresyon modeli yardımıyla araştırmışlardır. Çalışmanın analizinde teknolojik yenilik göstergesi olarak patent verileri kullanılmıştır. Ekonomik büyümenin kontrol değişkeni olarak kullanıldığı analiz bulgularına göre, teknolojik yenilikler yenilenebilir enerji üretimini hızlandırarak CO₂ emisyonlarının azaltmakta ve ekonomik büyümenin CO₂ emisyonları üzerindeki olumlu etkilerini dengelemektedir. Raihan vd. (2022) 1990-2019 dönemi için Malezya ekonomisinde, Raihan ve Tuspekova (2022) 1996-2018 dönemi için Kazakistan ekonomisinde yenilenebilir enerji tüketiminin, ekonomik büyümenin ve teknolojik yeniliklerin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Dinamik Sıradan En Küçük Kareler (DOLS) yöntemi uygulanan çalışmaların bulgularına göre, ekonomik büyüme ile CO₂ emisyonları arasında pozitif ve anlamlı bir ilişki bulunmakta, uzun dönemde ekonomik büyümede meydana gelen artış CO₂ emisyonlarını artırmaktadır. Yenilenebilir enerji tüketimindeki artış CO₂ emisyonlarını azaltırken, teknolojik yenilik göstergesi olan patent başvuru sayısındaki artış CO₂ emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Her iki çalışmanın ortak bulguları, yenilenebilir enerji kullanımı ve teknolojik yeniliklerin belirtilen dönem için Kazakistan ekonomisinde ve yine belirtilen dönem için Malezya ekonomisinde karbon emisyonlarını azaltırken, ekonomik büyümenin çevre kalitesini bozduğunu ortaya koymaktadır.

Teknolojik yeniliklerin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini farklı ekonomik sektörlerle ve ülke gelir gruplarına göre inceleyen çalışmalar da bulunmaktadır. Li vd. (2019) 2004-2016 dönemi verilerini kullanarak 30 Çin şehrinde ekonomik büyümenin ve yüksek teknoloji endüstrisinin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini araştırmak için panel STRIPAT-Durbin modeli uygulamışlardır. Araştırma bulgularına göre, ekonomik büyüme ile CO₂ emisyonları arasında pozitif ilişki varken, karbon emisyonları ile yüksek

teknolojili sanayi arasında negatif ilişki bulunmaktadır. Yüksek teknoloji sanayide meydana gelen artış CO₂ emisyonlarını azaltmaktadır. Wang vd. (2019) 2001-2013 dönemini veri olarak Çin ekonomisinde teknolojik ilerlemenin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini sektörel bazda araştırmışlardır. Analiz bulgularına göre, ağır ve hafif sanayideki teknolojik ilerleme CO₂ emisyonunu artırırken, inşaat ve hizmet sektörlerinde meydana gelen teknolojik ilerleme CO₂ emisyonlarını azaltmaktadır. Erdoğan vd. (2020) seçili G-20 ülkelerinde 1991-2017 dönemi için teknolojik yeniliklerin CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini sektörel bazda incelemişlerdir. Araştırma bulgularına göre uzun dönemde yeniliklerin; enerji, ulaşım ve diğer sektörler üzerinde etkisi bulunmamaktadır. Buna ek olarak, inşaat sektöründe inovasyonun artması CO₂ emisyonlarını artırırken, sanayi sektöründe inovasyonun artması CO₂ emisyonlarında azalmaya neden olmaktadır. Yan vd. (2022) tarım, endüstriyel üretim ve inşaat, hizmet sektörü ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi araştırmak için 1990-2014 dönemini veri olarak seçili G20 ülkeleri için panel veri analizi yöntemini uygulamışlardır. Araştırma bulgularına göre, söz konusu üç sektör ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişki, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında zıt sonuçlar göstermektedir. Apanasovich ve Apanasovich (2025) 83 ülke için 1996-2018 dönemi verilerini kullanarak teknolojik yenilikler ve ekonomik büyüme ile CO₂ emisyonu arasındaki ilişkiyi Panel Veri Analizi teknikleri yardımıyla incelemiştir. Çalışmada ülkeler yüksek, üst orta gelirli ve düşük orta gelirli ülkeler olarak sınıflandırılıp, ülke gelir gruplarına göre ayrı ayrı analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz bulgularına göre, yüksek gelirli ve üst orta gelirli ülkelerde teknolojik yenilikler ve ekonomik büyüme CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltırken, düşük orta gelirli ülkelerde aynı etkiyi göstermemektedir.

BİT'in çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi teorik ve ampirik literatürde yaygın bir şekilde araştırılmaktadır. BİT'in çevre kalitesi üzerinde farklı etkileri bulunduğundan, BİT ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişki inovasyon, ekonomik büyüme, üretim süreçleri, sanayileşme, teknolojik atıklar ve enerji tüketimi gibi farklı perspektiflerle ele alınıp incelenmektedir (Nguyen vd., 2020). Teknolojik yenilik göstergesi olarak BİT'nin kullanıldığı çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Park vd. (2018) AB ülkelerinde 2001-2014 dönemi için BİT ve ekonomik büyümenin CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini panel eşbütünleşme ve

panel nedensellik analizi yöntemiyle incelemişlerdir. Analiz bulgularına göre, BİT ile CO₂ emisyonları arasında pozitif ilişki bulunmaktadır. BİT’de meydana gelen gelişmeler CO₂ emisyonlarının azaltılmasında etkili değildir. Ayrıca ekonomik büyümenin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi AB ülkeleri arasında farklı sonuçlar göstermektedir. Lu (2018) 1993-2013 dönemi verilerini kullanarak 12 Asya ülkesinde (Avustralya, Çin, Hong Kong, Japonya, Hindistan, Endonezya, Kore, Malezya, Filipinler, Singapur, Tayland ve Türkiye) bilgi iletişim teknolojisi, enerji tüketimi, finansal gelişme ve ekonomik büyümenin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini Panel veri analizi teknikleri ile araştırmıştır. Panel eşbütünleşme analizi bulgularına göre, uzun dönemde ekonomik büyümede meydana gelen bir artış CO₂ emisyonlarını artırırken, BİT’te meydana gelen bir artış karbon emisyonlarını azaltmaktadır. Enerji tüketimi, finansal gelişme ve ekonomik büyüme ve karbon emisyonlarına neden olurken, BİT karbon emisyonlarının azalmasına katkıda bulunmaktadır. Nguyen vd. (2020) seçili 13 tane G20 ülkesinde (Arjantin, Kanada, Çin, Fransa, Almanya, İtalya, Japonya, Meksika, Kore Cumhuriyeti, Rusya Federasyonu, Türkiye, Birleşik Krallık, Amerika Birleşik Devletleri) 2000-2014 dönemini veri alarak BİT ve inovasyonun, CO₂ emisyonları ile ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi panel veri analizi yardımıyla ile araştırmışlar. Ampirik bulgularda BİT, inovasyon ve CO₂ emisyonları arasında negatif ilişki bulunurken, ekonomik büyümenin CO₂ emisyonlarını artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Khan (2022) 2001-2018 döneminde BİT ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi panel veri analizi yöntemiyle incelemiştir. Analiz bulgularına göre, BİT ile ilgili makinaların, ekipmanların ve altyapının üretimi çevre kalitesine zarar vererek ekolojik ayak izine neden olmaktadır. BİT ile ilgili ürünler yüksek maliyetlerle üretilmesine rağmen bu ürünlerin ihracatı çevresel bozulmaya katkıda bulunmaktadır. Kim (2022) 1990-2018 dönemi için OECD ülkelerinde yenilenebilir enerji, ticari açıklık, ekonomik büyüme, BİT ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Panel eşbütünleşme testi uzun dönem katsayı bulgularına göre, ekonomik büyümedeki bir artış CO₂ emisyonlarını artırırken, BİT’te meydana gelen bir artış CO₂ emisyonlarını artırmaktadır. Uzun dönem katsayıları küçük olmasına rağmen BİT CO₂ emisyonlarını artırmada önemli rol oynamaktadır. Yenilenebilir enerji ve ticari açıklık CO₂ emisyonlarını azaltmaktadır. Bildirici ve Ersin (2023) 9 ülke (Çin, Hindistan, İtalya, Almanya, Kanada,

Fransa, Japonya, Amerika Birleşik Devletleri ve Birleşik Krallık) için 2000–2021 dönemini veri alarak, endüstri 4.0 ile ilgili teknolojilerin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini araştırmıştır. Endüstri 4.0 ile ilgili değişkenler (Ar-Ge, BİT, Bitcoin, yapay zekâ) ile enerji tüketim seviyeleri, ekonomik büyüme ve CO₂ emisyonları değişkenlerinin kullanıldığı çalışmada, fourier panel eşbütünleşme ve fourier panel nedensellik analizi uygulanmıştır. Analiz bulgularına göre, endüstri 4.0 ile ilgili değişkenler uzun dönemde CO₂ emisyonlarını pozitif etkilemektedir. Endüstri 4.0 teknolojileri CO₂ emisyonlarının artmasına neden olurken, aynı zamanda ekonomik büyüme ve enerji tüketimindeki artış ile de yakından ilişkilidir. Naseem vd. (2023) BRICS ülkelerinde 2000-2019 arası dönemde BİT'in, CO₂ emisyonları ve ekonomik büyüme üzerindeki etkisini Panel veri analizi teknikleriyle araştırmıştır. Ampirik araştırma sonucuna göre, CO₂ emisyonları ile ekonomik büyüme arasında çift yönlü anlamlı bir ilişki bulunurken, BİT ile CO₂ emisyonları arasında negatif ilişki tespit edilmiştir. Ekonomik büyüme CO₂ emisyonlarını artırırken, BİT CO₂ emisyonlarının azalmasına yardımcı olarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır.

Akdemir ve Erkasap (2025) dünyada en fazla karbon emisyonuna neden olan 15 ülkenin 1997-2022 dönemi verilerini kullanarak, dijitalleşmenin, teknolojik yeniliğin ve BİT'lerin ticarete dayalı karbon emisyonları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Ayrıca söz konusu etkide ekonomik büyümenin rolü de incelenmiştir. Panel Veri Analizi tekniklerinin uygulandığı araştırmanın bulgularına göre, teknolojik yenik, dijitalleşme ve artan BİT kullanımı çevresel sorunlara yol açarak karbon emisyonlarını artırabilir. Ekonomik büyüme ile karbon emisyonları arasında pozitif bir ilişki bulunmaktadır. Manglani vd. (2025) 22 tane gelişmekte olan ülke ekonomilerinde 2000-2021 arası dönemde dijital ticaret, BİT ihracatı ve ekonomik büyüme ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi araştırmak için Panel Veri Analizi tekniklerini uygulamışlardır. Analiz bulgularına göre dijital ticaret ve BİT ihracatı çevresel sürdürülebilirlik üzerinde pozitif ve anlamlı bir ilişkiye sahipken, ekonomik büyümenin ise sürdürülebilirlik üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Dijital ticaret ve BİT ticareti yenilebilir enerji tüketimini teşvik ederek çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında önemli bir etkide bulunurken, ekonomik büyüme çevre kalitesinin bozulmasına neden olabilir.

Ekonomik büyüme, çevrenin önde gelen belirleyicilerinden biridir. Kuznets eğrisi (EKC) hipotezi, çeşitli çevresel göstergeler kullanılarak birçok araştırmacı tarafından uzun süredir araştırılmaktadır. Ekonomik büyüme ile çevre arasındaki ilişkiyi araştıran Grossmann ve Krueger (1991) ekonomik büyüme arttıkça çevresel kalite göstergeleri arasında ters U şeklinde bir ilişki bulunduğunu ileri sürmüştür. Panayotou (1993) bu ilişkiyi, kişi başına gelir belirli bir eşiğin üzerine çıktıkça çevresel bozulmanın önce arttığını sonra azaldığını belirten çevresel EKC hipotezi olarak tanımlamıştır. Ülkeler ekonomik gelişmelerinin ilk aşamalarında ilkel teknolojilerle, yoğun kirliliğe neden olan tarımla ve ağır sanayilerle uğraştıklarından çevre kalitesinin bozulmasına neden olurlar. Ancak ekonomik gelişmelerinin ileriki evrelerinde kişi başına düşen gelir miktarı belirli bir seviyeye ulaştığında ülkelerin ekonomik yapıları bilgi yoğun sanayiye ve hizmet sektörlerine doğru kaymaktadır. Böyle bir dönüşüm, daha temiz üretim teknolojilerinin kullanılmasını mümkün kılarak çevresel kirliliğin azalmasına yardımcı olmaktadır (Dogan ve Pata, 2022). Merdani vd., (2019) 1995-2017 yılları arası verileri kullanarak uygulamış oldukları meta-analiz yöntemi sonucunda, ekonomik büyüme ile CO₂ emisyonları arasında çift yönlü nedensellik ilişkisinin var olduğunu gözlemlemişlerdir. Ekonomik büyüme arttıkça CO₂ emisyonları artarken, CO₂ emisyonları azaldıkça ekonomik büyüme de bu durumdan etkilenmektedir. Adebayo (2021) Güney Kore ekonomisinde 1965-2019 arasındaki dönemi kapsayan verileri kullanarak, CO₂ emisyonları ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi ARDL yöntemiyle incelemiştir. Ampirik bulgulara göre, kısa dönemde CO₂ emisyonlarında meydana gelen artış ekonomik büyümeyi azaltırken, uzun dönemde CO₂ emisyonlarında meydana gelen artış ekonomik büyümeyi artırmaktadır. Dam vd. (2014) Türkiye için 1960-2009 dönemini veri alarak ekonomik büyüme, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları arasındaki ilişkiyi Dinamik En Küçük Kareler yöntemiyle araştırmışlardır. Çalışmada kişi başı gelir, kişi başı GSYİH ve kişi başı enerji tüketimi değişkenleri kullanılarak, DOLS tahmincisi yardımıyla model tahmin edilmiştir. Analiz bulgularından gelir ile çevresel kirliliği temsil eden CO₂ emisyonları arasındaki ilişkinin EKC hipotezini desteklenmediği, kişi başı CO₂ emisyonları ile kişi başı gelir arasında ters N şeklinde bir ilişkinin olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Al Mamun vd. (2025) 106 orta gelirli ülkenin 1980-2023 dönemini veri alarak, ekonomik büyüme ve CO₂ emisyonları arasındaki uzun ve kısa dönemli

ilişkiyi Panel Vektör Hata Düzeltme Modeli (VECM) yardımıyla analiz etmişlerdir. Analiz bulgularına göre, kısa dönemde ekonomik büyüme ve CO₂ emisyonları arasında anlamlı bir ilişki varken, iki değişken arasında uzun dönemde bir ilişki tespit edilememektedir.

Literatür özeti değerlendirildiğinde; teknolojik yeniliklerin ve BİT'lerin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi farklı ekonomik sektörlerle, ülke gelir düzeylerine ve yenilik türleri gibi uygulama alanlarına göre değişiklik göstermektedir. Bazı çalışmalarda Ar-Ge faaliyetleri ve yenilebilir enerjiye yönelik yapılan yatırımların CO₂ emisyonlarını azalttığı, ekonomik büyümenin çevresel kirliliğe yol açtığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca bazı araştırmalara göre Endüstri 4.0 ve teknolojik gelişme süreci endüstri faaliyetlerinin yoğun olduğu ülkelerde karbon emisyonlarını artırabilmektedir. Teknolojik yenilikler ve BİT çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında etkili olabilir; fakat ekonomik büyümenin sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi finansal gelişme, nüfus artışı, gelir düzeyi, enerji tüketimi gibi diğer faktörlere göre önemli ölçüde değişiklik gösterebilmektedir.

4. VERİ SETİ, YÖNTEM VE BULGULAR

Çalışmanın bu aşamasında veri merkezlerinden derlenen verilerin tanımlanması, analiz yapılabilir hale gelmesi ve analiz için kullanılan yöntem ve bulgulara yer verilmiştir.

4.1. Veri Süreci ve Analize Giriş

Çalışmada, panel veri seti kapsamında seçilmiş olan 16 tane G20 (Arjantin, Avustralya, Brezilya, Çin, Almanya, Fransa, Birleşik Krallık, Hindistan, İtalya, Japonya, Güney Kore, Meksika, Türkiye, Amerika Birleşik Devletleri, Güney Afrika ve Kanada) ülkesi için 2000-2020 dönemi yıllık verileri kullanılarak, Endüstri 4.0 kapsamında teknolojik yeniliklerin ve ekonomik büyümenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi ampirik olarak araştırılmıştır. Çalışma, genişletilebilir veri setine ulaşılamadığı için 16 tane G20 ülkesi ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca pandemi dönemi etkisinin tespiti için de 2020 yılı son dönem olarak tercih edilmiştir. BİT ile ilgili veriler 2000 yılından itibaren mevcut olduğu için, tüm veri setinin

doğruluğunu ve geçerliliğini sağlamak için analiz için uygun tarih aralığı 2000-2020 olarak belirlenmiştir.

Çalışmada çevresel sürdürülebilirliği temsil etmek için CO₂ emisyonları (kişi başı, milyar ton) teknolojik yenilikleri temsil etmek BİT ihracatı (toplam mal ihracatı içindeki payı, %) ve ekonomik büyümeyi temsil etmek için reel GSYİH (USD) verisi kullanılmıştır. Ekonometrik modelde kullanılan değişkenleri temsil eden verilerden, GSYİH ve BİT ihracatı verileri Dünya Bankası (databank.worldbank.org) veri tabanından elde edilirken, CO₂ emisyonları verileri emisyon araştırmaları için küresel veri tabanı (EDGAR) kaynaklarından elde edilmiştir. Çalışmanın analizinin yapılabilmesi için veri seti derlenmiş ve elde edilen veri setinde; bireyler, ülkeler, firmalar, hane halkları gibi birimlere ait yatay kesit gözlemlerin bulunmasından dolayı ve bu verilerin, belli bir dönemde bir araya getirilmiş olmasından dolayı panel veri analizi yapılmıştır (Tatoğlu 2012: 2). Panel veriye ait genel model aşağıdaki şekildedir:

$$Y_{it} = \alpha + \beta_{1it}X_{1it} + \dots + \beta_{kit}X_{kit} + e_{it} \quad (1)$$

$i=1,2,\dots,N$ ve $t=1,2,\dots,T$ olup i : yatay kesitleri ve t : zaman boyutunu göstermektedir.

Buna göre çalışmadaki değişkenler yardımıyla model aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur:

$$CO_{2it} = \alpha + \beta_1 rGSYİH_{it} + \beta_2 BİT_{it} + e_{it} \quad (2)$$

($i=1, 2, 3, \dots, N$); ($t=1, 2, 3, \dots, T$)

Modelde, CO₂: karbon emisyonu, rGSYİH: reel ekonomik büyüme, BİT: bilgi iletişim teknolojileri ihracatını göstermektedir.

Panel veri setinde yatay kesitleri oluşturan-ülkeler arasındaki yatay kesit bağımlılığı (Cross-Section Dependence-CD) araştırması, bu testi ilk kez çalışan Berusch-Pagan (1980) tarafından ortaya atılan (Lagrange Multiplier-LM testi) ve sonraki çalışmaları ortaya koyanlar Pesaran (2004) Cross-Section Dependence Scaled LM-CDLM, Pesaran (2004) CD ve sapması düzeltilen (Bias-corrected scaled) LM Baltagi, Feng ve Kao (2012) testi kullanılmıştır. Ülkeler arasında yatay kesit bağımlılığının tespit edilmesinden sonra serilerde heterojenlik (heterogeneity) durumu Pesaran ve Yamagata (2008) Homojenite Testi yardımıyla tahmin edilmiştir. Serilerdeki birimkök araştırması için yatay kesit bağımlılığının tespitinden dolayı ikinci nesil birim kök testlerinden, Pesaran (2007) Cross-Sectionally Augmented Dickey Fuller-CADF ve Pesaran (2007) cross-sectionally augmented panel unit root

test-CIPS testi yardımıyla hesaplanmıştır. Panel eşbütünleşme analizi araştırması için ise Westerlund Durbin-Hausman (2008) WDH testi kullanılmıştır. Son olarak uzun dönem ilişki için Pesaran (2006) Common Correlated Effects-CCE ve Eberhardt & Bond (2009) ve Eberhardt & Teal (2010) Augmented Mean Group- AMG tahmincisi kullanılmış ve serilerin uzun dönem eşbütünleşme katsayıları hesaplanmıştır.

4.2. Analiz Bulguları

Analizin ilk aşamasında veri setini oluşturan data kapsamındaki ülkeler arasında yatay kesit bağımlılığı, Breusch-Pagan (1980), Pesaran (2004), Sapması Düzeltilmiş LM ve Pesaran CD testi yardımıyla araştırılmıştır. Tahmin edilen değerlere bakıldığında olasılık değerlerinin 0,05 kritik değerinden küçük olmasından dolayı yatay kesit bağımlılığı yoktur boş hipotezi reddedilmiştir. Bu analizlerin ortak sonucuna göre ülkeler arasında yatay kesit bağımlılığının olduğu görülmüş ve sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Yatay Kesit Bağımlılığı (CD) Testi Bulguları

CD TEST	Breusch-Pagan LM (1980)	Pesaran CDLM (Pesaran, 2004)	Pesaran (2004) CD	(Baltagi, Feng ve Kao 2012), Sapması Düzeltilmiş LM
CO ₂	1690,96 (0,00)	82,19 (0,00)	81,71 (0,00)	5,89 (0,00)
rGSYİH	1476,32 (0,00)	70,58 (0,00)	70,11 (0,00)	37,08 (0,00)
BİT	1617,94 (0,00)	78,24 (0,00)	77,76 (0,00)	24,51 (0,00)
MODEL	1094,67 (0,00)	61,88 (0,00)	2,91 (0,00)	108,86 (0,00)
H₀: Yatay Kesit Bağımlılığı Yoktur				

Not: Parantez içindeki değerler olasılık (Prob) değerlerini göstermektedir.

Ülkeler arasında yatay kesit bağımlılığının tespit edilmesinin ardından panelin homojenitelelik araştırması Hsiao (1986) Testi yardımıyla araştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Homojenite Testi Bulguları

Hipotezler	F-İst.	P-Value
MODEL		
H₁ =Panel Homojendir veya Alternatif Hipotez: H ₂	263,28	0,00
H₂ = H ₃ veya Alternatif Hipotez: Panel Heterojendir	10,54	0,00
H₃ = Panel Homojendir veya Alternatif Hipotez: Panel kısmi Homojendir	404,68	0,00

Homojenite araştırması için yapılan analizden elde edilen tahmin bulgularına göre serilerin heterojen olduğu sonucu elde edilmiştir. Yani panel veri setini oluşturan her ülke için elde edilen katsayıların farklı olması her ülkenin farklı şekilde etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın yatay kesit bağımlılığının ve heterojenliğinin tahmin edilmesi ve belirlenmesi aşamasından sonra, paneli oluşturan serilerin birimkök analizi yatay kesit bağımlılığını dikkate alan ikinci nesil birim kök testlerinden Pesaran (2006, 2007) CADF testi ile araştırılmıştır. CADF testi paneli oluşturan serilerdeki her bir yatay kesit birimi yani her ülkeye ait birim kök testi sonuçlarını hesaplama imkanı sunmaktadır. Ayrıca her bir yatay kesit için birimkök test istatistiklerinin ortalamasını alarak panelin geneli için birim kök test istatistiğini hesaplayan Pesaran (2006) CIPS testi ile araştırılmıştır. Son olarak elde edilen testin tahminlenen bulguları N>T ve T>N için tutarlıdır.

Tablo 3. Panelin Birimkök Testi (CIPS) Bulguları

Birimkök Testi	Pesaran CIPS	%1	%5
CO ₂	-1,79 >= 0,10*	-2,46	-2,25
rGSYİH	-2,56 < 0,01	-2,46	-2,25
BİT	-2,43 < 0,05	-2,46	-2,25
H₀: Birim kök			

Analiz sonucunda paneli oluşturan serilerden CO₂ değişkeninin I(1) yani birimkök içerdiği, ancak rGSYİH ve BİT değişkenlerinin ise I(0) yani birimkök içermediği tespit edilmiş ve elde edilen bulgular Tablo 3' te verilmiştir. Ayrıca paneli oluşturan yatay kesit birimleri yani ülkelerin her birisi için CADF birimkök testi sonuçları da Tablo 4'te verilmiştir.

İKTİSADİ PERSPEKTİFTEN SOSYAL BİLİMLERDE GÜNCEL
ÇALIŞMALAR: KURAMSAL VE UYGULAMALI İNCELEMELER

Tablo 4. Yatay Kesitlerin Birimkök Testi (CADF) Bulguları

Yatay Kesitler	CO ₂			rGSYİH			BİT		
	GD	t-ist	p-değeri	GD	t-ist	p-değeri	GD	t-ist	p-değeri
Arjantin	2	-3,00	>=0,10*	2	-3,87	<0,05	0	-2,54	>=,10*
Avustralya	0	0,25	>=0,10*	2	-2,63	>=,10*	0	-1,21	>=,10*
Brezilya	0	-1,27	>=0,10*	0	-1,93	>=,10*	0	-2,25	>=,10*
Çin	2	-2,40	>=0,10*	2	-1,88	>=,10*	2	-6,03	<0,01
Almanya	2	0,62	>=0,10*	0	-2,42	>=,10*	0	-1,19	>=,10*
Fransa	0	-1,07	>=0,10*	0	-1,29	>=,10*	2	-3,78	<0,05
Birleşik K,	2	-2,59	>=0,10*	2	-1,34	>=,10*	2	-4,14	<0,05
Hindistan	1	-2,40	>=0,10*	0	-3,26	<0,10	2	-3,21	<0,10
İtalya	0	-2,59	>=0,10*	1	-2,61	>=,10*	1	-1,66	>=,10*
Japonya	2	-2,96	>=0,10*	2	-1,17	>=,10*	0	-1,98	>=,10*
Kore	2	-3,18	<0,10	2	-6,72	<0,01	1	-0,62	>=,10*
Meksika	2	-0,81	>=0,10*	2	-1,69	>=,10*	2	-3,32	<0,10
Türkiye	1	-1,05	>=0,10*	1	-2,46	>=,10*	2	-1,87	>=,10*
ABD	0	-1,91	>=0,10*	2	-1,21	>=,10*	2	-0,23	>=,10*
G Afrika	0	-1,73	>=0,10*	2	-3,83	<0,05	2	-2,54	>=,10*
Kanada	0	-2,51	>=0,10*	0	-2,58	>=,10*	2	-2,24	>=,10*

Ho: Yatay Kesitler için Birimkök, GD: ADF Lags (Gecikme Değerleri), *: Birimkök

Buna göre, CO₂ serisi yalnızca Güney Kore için, rGSYİH serisi Hindistan, Güney Kore ve Güney Afrika için ve BİT serisi ise Çin, Fransa, Birleşik Krallık, Hindistan ve Meksika için birimkök sürecinde olmayan seriler olduğu görülmektedir. Yani birimkök süreci içermeyen serilere gelen şokların geçici etkilere sahip olması, aksi durumda ise kalıcı etkilerin söz konusu olması demektir.

Çalışmayı oluşturan seriler arasındaki ilişkinin tespit edilmesi için serilerin uzun dönemde birlikte hareket edip etmediğinin araştırılması gerekmektedir. Bu araştırma için eşbütünleşme analizi yapılmaktadır. Paneli oluşturan seriler arasındaki uzun dönem ilişkilerin durumu Westerlund Durbin-Hausman (WDH) Eşbütünleşme Testi ile hesaplanmıştır. Westerlund (2008) tarafından geliştirilen WDH Eş-Bütünleşme testi, bağımlı değişkenin I(1), bağımsız değişkenlerin I(1) veya I(0) olması durumunda uzun dönemli ilişkileri analiz etmekte ve paneldeki ortak faktörlerin varlığını analize dahil ederek hesaplama yapmaktadır. Panelin homojenliğini ve heterojenliğini dikkate alarak her ikisi için de tahminler yapmaktadır. DH testi, uzun dönemli eş-bütünleşme ilişkilerini DHg, grup testinde otoregresif parametrenin kesitler arasında farklılaştığı yani heterojenlik, DHp, panel testinde ise otoregresif parametrenin tüm kesitler için aynı olduğu yani homojenlik tahmin sonuçlarını vermektedir (Westerlund, 2008: 196-199). WDH testi sonucunda elde edilen hesaplamalara ilişkin bulgular Tablo 5’te sunulmuştur.

Tablo 5. WDH Eşbütünleşme Testi Bulguları

Test	DHg test ist.	DHg_p-değeri	DHp test ist.	DHp_p-değeri
WDH Eşbütünleşme Testi	111,432	0,000	9,469	0,000
H₀: Eşbütünleşme yok				

Elde edilen bulgulara göre, panel veri setini oluşturan ülkeler için ilgili değişkenler arasında uzun dönem ilişki tespit edilmiştir. Yani panel veri setini oluşturan değişkenlerin eşbütünleşik olduğu bulgusuna ulaşılmıştır. Yani CO₂, rGSYİH ve BİT değişkenleri uzun dönemde birlikte hareket etmektedir. Bu aşamadan sonra ülkeler arasındaki uzun dönemli ilişkiyi ortaya koymak için uzun dönem eşbütünleşme katsayıları, Pesaran (2006, 2015) Common Correlated Effects Mean Group Estimator-CCEMG, Eberhardt & Bond (2009) ve Eberhardt & Teal (2010) Augmented Mean Group estimator- AMG testleri ile tahmin edilmiş olup test bulguları aşağıdaki model üzerinde gösterilmiştir. Köşeli parantez içindeki değerler p-olasılık değerlerini göstermektedir.

$$CO2_{it} = -0,0069 + 0,002rGSYİH_{it} - 0,05BİT_{it} + e_{it} \quad (3)$$

[0,99] [0,55] [0,09]

Pesaran (2006, 2015) CCEMG testinden elde edilen uzun dönem eş bütünleşme katsayılarına göre, %10 anlamlılık düzeyinde BİT değişkeninde meydana gelen %1'lik artış, CO₂ değişkenini %0,05'lik bir azaltıcı etkiye sahiptir.

$$CO2_{it} = 1,37 + 0,00007rGSYİH_{it} - 0,21BİT_{it} + e_{it} \quad (4)$$

[0,00] [0,98] [0,04]

Eberhardt & Bond (2009) ve Eberhardt & Teal (2010) AMG testinden elde edilen uzun dönem eş bütünleşme katsayılarına göre ise, %5 anlamlılık düzeyinde BİT değişkeninde meydana gelen %1'lik bir artış CO₂ değişkeninde %0,21'lik bir azaltıcı etki yaptığı bulgusuna erişilmiştir. Modelde BİT değişkeninin negatif işaretli olması, BİT'in küresel CO₂ emisyonları üzerinde ters etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yani BİT ihracatında meydana gelen olumlu gelişmeler CO₂ salınımını azaltarak çevreye pozitif yansımaktadır. Yukarıda yer alan her iki modele göre, BİT ile CO₂ değişkenleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunurken, rGSYİH değişkeni ile CO₂ değişkeni arasında anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir.

5. SONUÇ

Çalışmada 2000-2020 dönemi yıllık verileri kullanılarak seçili G20 ülkelerinde endüstri 4.0 kapsamında teknolojik yeniliklerin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi Panel Veri Analizi ile tahmin edilmiştir. Çeşitli sera gazı emisyonları arasında, karbondioksit emisyonları en yüksek katkıya sahiptir (Liu vd, 2023). Küresel ısınmaya katkıda bulunan her gazın bir karbondioksit eşdeğeri sayıldığı için, çalışmada çevresel sürdürülebilirliği ele almak için CO₂ emisyonu verisi kullanılmıştır (Nejad, 2022). Çalışmada çevresel sürdürülebilirliği sağlamada etkisi olabileceği düşünüldüğü için teknolojik yenilikleri temsil etmek için BİT ihracatı verisi kullanılmıştır. Ayrıca ekonomik büyümede meydana gelen artışın CO₂ emisyonunu etkileyen önemli bir faktör olarak görüldüğü ve teknolojik yenilikler ile yakın ilişkili olduğundan ekonomik büyüme değişkeni rGSYİH ekonometrik modele dahil edilmiştir.

Bu kapsamda yapılan analizler, ülkeler arasında yatay kesit bağımlılığı, Berusch-Pagan (1980) Lagrange Multiplier-LM testi, Pesaran (2004) Cross-Section Dependence Scaled LM-CDLM, Pesaran (2004) CD ve Baltagi, Feng ve Kao (2012) Bias-corrected scaled LM testleri yardımıyla araştırılmıştır. Panelin homojenite testleri Hsiao (1986) Testi yardımıyla araştırılmış ve elde edilen bulgulara göre serilerin heterojen olduğu yani panel veri setini oluşturan her ülke için elde edilen katsayıların farklı olduğunu ortaya koymuştur. Bu ise her ülkenin farklı şekilde etkilendiğini göstermektedir. Paneli oluşturan serilerin birim kök analizi yatay kesit bağımlılığını dikkate alan ikinci nesil birim kök testlerinden Pesaran (2006, 2007) CADF testi ve panelin geneli için ise Pesaran (2006) CIPS testi kullanılmıştır. Paneli oluşturan serilerden CO₂ değişkeninin I(1), ancak rGSYİH ve BİT değişkenlerinin ise I(0) oldukları tespit edilmiştir. Bu aşamada serilerin bir kısmının I(0) bir kısmının ise I(1) olması nedeniyle bu durumu ve ayrıca serilerin homojenlik ve heterojenliğini de dikkate alan Paneli oluşturan seriler arasındaki uzun dönem ilişkilerin durumu Westerlund (2008) tarafında geliştirilen WDH eşbütünleşme Testi ile hesaplanmıştır. Eşbütünleşme Testi sonuçlarına göre, panel veri setini oluşturan ülkeler için değişkenler arasında uzun dönem ilişki olduğu yani panel veri setini oluşturan değişkenlerin eşbütünleşik oldukları görülmüştür. Yani CO₂, rGSYİH ve BİT değişkenlerinin uzun dönemde birlikte hareket ettikleri tespit edilmiştir. Son

olarak analizler, ülkeler arasındaki uzun dönemli ilişkiye dair uzun dönem eşbütünleşme katsayıları, Pesaran (2006, 2015) CEMG, Eberhardt & Bond (2009) ve Eberhardt & Teal (2010) AMG testleri ile tahmin edilerek çalışma sonuçlandırılmıştır. Buna göre, Pesaran (2006, 2015) CCEMG testi uzun dönem eş bütünleşme katsayıları, %10 anlamlılık düzeyinde BİT değişkeninde meydana gelen %1’lik artış, CO₂ değişkenini %0,05’lik bir azaltıcı etki olduğunu göstermektedir. Eberhardt & Bond (2009) ve Eberhardt & Teal (2010) AMG testi uzun dönem eş bütünleşme katsayılarına göre ise, %5 anlamlılık düzeyinde BİT değişkenindeki %1’lik bir artış CO₂ değişkeninde %0,21’lik bir azaltıcı etki yapmaktadır. Modelde BİT değişkeninin negatif işaretli olması, BİT’in küresel CO₂ emisyonları üzerinde ters etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca çalışmada kurulan modeller çerçevesinde, BİT ile CO₂ değişkenleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunurken, rGSYİH değişkeni ile CO₂ değişkeni arasında anlamlı bir ilişkiye yapılan analizler kapsamında rastlanılmamıştır.

Analiz bulgularına göre, BİT ihracatındaki artış, enerji verimliliğinin sağlanması yoluyla CO₂ emisyonlarını azaltarak çevre kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunabilir. Araştırma sonuçları, endüstri 4.0’ın uygulanması sürecinde seçili G20 ülkelerinde teknolojik yeniliklerin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın bulguları, BİT’in CO₂ emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliği artırdığı sonucuna ulaşan literatür özetinde yer alan Lu, 2018; Nguyen vd., 2020; Naseem vd., 2023; Manglani vd. (2025)) tarafından yapılan çalışmaların bulgularıyla uyumludur. Bu çalışmanın aksine (Khan, 2022) BİT ihracatının ekolojik ayak izine neden olarak çevre kalitesine zarar verdiği sonucuna ulaşmıştır. Ekonomik büyümenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini inceleyen literatürdeki bazı araştırmalar, ekonomik büyüme ile CO₂ emisyonları arasında pozitif bir ilişki olduğunu ileri sürmüşlerdir. Park vd. (2018), Nguyen (2020), Raihan vd. (2022) ve Raihan ve Tuspekova (2022), Kim (2022), Naseem vd (2023), çalışmalarından elde edilen ampirik bulgulara göre ekonomik büyüme CO₂ emisyonlarını artırmaktadır. Khan (2023), Çobanoğulları (2024) ekonomik büyüme ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiye yönelik yaptıkları ampirik araştırmalarının bulgularına göre, CO₂ emisyonları ve ekonomik büyüme arasında anlamlı bir ilişki bulunmamaktadır.

Bu çalışmanın 16 tane G20 ülkesini kapsaması, teknolojik yenilikler ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi farklı gelir düzeyleri ve sanayi yapıları açısından değerlendirerek, coğrafi ve ekonomik olarak karşılaştırma yapılmasına imkan tanımaktadır. Çalışmada teknolojik yenilikleri temsil etmek için BİT ihracatı değişkeninin kullanılması, mevcut literatürden önemli ölçüde farklılaşmaktadır. Mevcut literatürde genellikle Ar-Ge, patent sayısı ve yenilebilir enerji tüketimi verisi teknolojik yenilik göstergeleri olarak kullanılırken, BİT ihracatı ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi araştıran çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışma endüstri 4.0 kapsamında teknolojik yeniliklerin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini uluslararası düzeyde inceleyerek literatüre güncel ve özgün bir katkı sunmaktadır.

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Çalışmada çevresel sürdürülebilirliği araştırmak için CO₂ verisine odaklanılmıştır. Çalışmada uzun dönem eşbütünlük testi katsayıları hesaplanırken, ulaşılabilen veri seti ile kısa dönem nedensellik testi sonucu anlamsız bulunduğundan çalışmanın analizine dahil edilmemiştir. Tüm bu kısıtları ele alarak gelecekte yapılacak olan çalışmalarda daha genişletilebilir veri seti ile analiz yapılarak farklı sonuçlara ulaşılabilir ve ampirik boşluk kapatılabilir. Endüstri 4.0'ü temsil eden teknolojilerle, BİT araçları ve çevresel sürdürülebilirliği temsil eden farklı değişkenlerle, hedef ülke ve bölgeler esas alınarak farklı ekonometrik yöntemlerle araştırmalar yapılabilir.

Günümüzde endüstri 4.0 ile birlikte endüstri 5.0 kavramı da tartışılmaya başlanmıştır. Endüstri 4.0 ile ilgili teknolojilerin ve yazılımların gelişmesiyle enerji tasarrufunu artıran BİT temelli cihazların üretiminin artması, yüksek teknoloji sanayilerin desteklenmesi ve çevre dostu teknolojilerin yaygınlaşması beklenmektedir. Endüstri 5.0 ise bu dijital altyapıyı insan merkezli bir yaklaşımla tamamlayıp, küresel salgın, iklim değişikliği, savaş ve kriz dönemlerinde daha esnek ve daha dayanıklı üretim sistemleri oluşturmayı hedeflemektedir. Bu hedeflerle insan-makine işbirliği ve çevre dostu üretim anlayışının yaygınlaşması, kaynakların verimli kullanılmasına ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesine katkıda bulunacaktır. Hükümetler, fosil yakıt kullanımını azaltıcı politikalar oluşturmalı ve yenilenebilir enerjiye yatırım yaparak, sürdürülebilir tüketim ve üretim yönelimlerini güçlendirmeli, yeşil teknoloji ve alternatif enerji kaynaklarının teşvik edilmesiyle çevreye yönelik elverişli teknolojik ortamı oluşturmalıdır. Bu çabalar, zararlı emisyonların kontrol altına alınması ve sürdürülebilir

kalkınma hedeflerine ulaşılması için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, çevresel kirlilikle mücadelede etkili olacak şekilde çevre yasaları ve atık vergileri uygulanmalı, belirli ürün veya ürünlerin tüketimine yönelik sınırlandırmalar getirilmeli, tüketicileri daha az zararlı tüketim alışkanlıklarına yönlendirmeleri ve böylece daha sağlıklı yaşam tarzının benimsenmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Adebayo, T. S., Awosusi, A. A., Kirikkaleli, D., Akinsola, G. D., & Mwambra, M. N. (2021). Can CO₂ emissions and energy consumption determine the economic performance of South Korea? A time series analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 38969–38984. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-232271/v1>
- Ahmed, Z., Nathaniel, S. P., & Shahbaz, M. (2021). The criticality of information and communication technology and human capital in environmental sustainability: Evidence from Latin American and Caribbean countries. *Journal of Cleaner Production*, 286(2), 125529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125529>
- Akçacı, T., & Bulut, E. (2017). Endüstri 4.0 ve inovasyon göstergeleri kapsamında Türkiye analizi. *ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi*, 4(7), 55–77.
- Akdemir, Ö. G., & Erkasap, A. (2025). Impact of digitalization, technological innovation, and ICTs on sustainability. *Sustainability*, 17(12), 5351. <https://doi.org/10.3390/su17125351>
- Al Mamun, T. G. M., Ehsanullah, Hassan, M. B. A., & Oláh, J. (2025). Has the Paris Agreement shaped emission trends? A panel VECM analysis of energy, growth, and CO₂ in 106 middle income countries. *arXiv (Advance online publication)*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.14946>
- Apanasovich, N., & Apanasovich, T. (2025). The impact of technological innovations and economic growth on CO₂ emissions in the global context. *Discover Environment*, 3, Article 182. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00376-7>
- Baltagi, B. H., Feng, Q., & Kao, C. (2012). A Lagrange multiplier test for cross-sectional dependence in a fixed effects panel data model. *Journal of Econometrics*, 170(1), 164–177. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2012.04.004>
- Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448–463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239>
- Bildirici, M., & Ersin, Ö. (2023). Nexus between Industry 4.0 and environmental sustainability: A Fourier panel bootstrap cointegration and causality analysis. *Journal of Cleaner Production*, 386, 135786. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135786>

- Braccini, A. M., & Margherita, E. G. (2019). Exploring organizational sustainability of Industry 4.0 under the triple bottom line: The case of a manufacturing company. *Sustainability*, 11(1), 36. <https://doi.org/10.3390/su11010036>
- Breusch, T. S., & Pagan, A. (1980). The Lagrange multiplier test and its application to model specification in econometrics. *The Review of Economic Studies*, 47(1), 239–253. <https://doi.org/10.2307/2297111>
- Busu, M. (2020). Analyzing the impact of the renewable energy sources on economic growth at the EU level using an ARDL model. *Mathematics*, 8(8), 1367. <https://doi.org/10.3390/math8081367>
- Cheng, C., Ren, X., Dong, K., Dong, X., & Wang, Z. (2021). How does technological innovation mitigate CO₂ emissions in OECD countries? Heterogeneous analysis using panel quantile regression. *Journal of Environmental Management*, 280, 111818. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111818>
- Choi, S., & Ng, A. (2011). Environmental and economic dimensions of sustainability and price effects on consumer responses. *Journal of Business Ethics*, 104, 269–282. <https://doi.org/10.1007/s10551-011-0908-8>
- Çobanoğulları, G. (2024). Exploring the link between CO₂ emissions, health expenditure, and economic growth in Türkiye: Evidence from the ARDL model. *Environment, Development and Sustainability*, 26(11), 29605–29619. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04835-8>
- Dam, M. M., Karakaya, E., & Bulut, Ş. (2014). Çevresel Kuznets eğrisi ve Türkiye: Ampirik bir analiz. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 85–96.
- Dempsey, N., Bramley, G., Power, S., & Brown, C. (2011). The social dimension of sustainable development: Defining urban social sustainability. *Sustainable Development*, 19(5), 289–300. <https://doi.org/10.1002/sd.417>
- Dogan, A., & Pata, U. K. (2022). The role of ICT, R&D spending and renewable energy consumption on environmental quality: Testing the LCC hypothesis for G7 countries. *Journal of Cleaner Production*, 380(6), 135038. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135038>
- Eberhardt, M., & Bond, S. (2009). *Cross-section dependence in nonstationary panel models: A novel estimator* (MPRA Paper No. 17692). Munich Personal RePEc Archive.
- Eberhardt, M., & Teal, F. (2010). *Aggregation versus heterogeneity in cross-country growth empirics*. CSAE. (Rapor türü/numara/URL eksik.)
- EBSO. (2015). *Sanayi 4.0*. <https://www.ebso.org.tr/yayinlar/sanayi-40> (Erişim tarihi: 7 Haziran 2016)

- EDGAR. (2022). *CO₂ emissions of all world countries: IEA/PBL 2022 report*. Publications Office of the European Union. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2022 (Erişim tarihi: 22 Mart 2023)
- EDGAR. (2025). *GHG emissions of all world countries: IEA/PBL 2025 report*. Publications Office of the European Union. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2025 (Erişim tarihi: 1 Aralık 2025)
- Elkington, J. (1998). Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business. *Environmental Quality Management*, 8(1), 37–51. <https://doi.org/10.1002/tqem.3310080106>
- Erdoğan, S., Yıldırım, S., Yıldırım, D. Ç., & Gedikli, A. (2020). The effects of innovation on sectoral carbon emissions: Evidence from G20 countries. *Journal of Environmental Management*, 267, 110637. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110637>
- European Commission. (2025, September 9). *World emissions hit record high, but the EU leads trend reversal*. Joint Research Centre: EU Science Hub. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/world-emissions-hit-record-high-eu-leads-trend-reversal-2025-09-09_en (Erişim tarihi: 3 Aralık 2025)
- Fernandez, F. Y., & Lopez, F. M. A. (2018). Innovation for sustainability: The impact of R&D spending on CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3459–3467. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.001>
- Ferreira, J. J., Lopes, J. M., Gomes, S., & Rammal, H. G. (2023). Industry 4.0 implementation: Environmental and social sustainability in manufacturing multinational enterprises. *Journal of Cleaner Production*, 404, 136841. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136841>
- GeSI. (2008). *SMART 2020: Enabling the low-carbon economy in the information age*. <https://gesi.org/research/smart-2020-enabling-the-low-carbon-economy-in-the-information-age> (Erişim tarihi: 4 Nisan 2023)
- 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>
- Glavič, P., & Lukman, R. (2007). Review of sustainability terms and their definitions. *Journal of Cleaner Production*, 15(18), 1875–1885. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.12.006>
- 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>

- Hermann, M., Otto, B., & Pentek, T. (2016). Design principles for Industrie 4.0 scenarios: A literature review. In *Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)* (pp. 3928–3937). (Yayınevi/DOI eksik.)
- Higon, D. A., Gholami, R., & Shirazi, F. (2017). ICT and environmental sustainability: A global perspective. *Telematics and Informatics*, 34(4), 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2017.01.001>
- Hsiao, C. (1986). *Analysis of panel data*. Cambridge University Press.
- Huang, Y., Haseeb, M., Usman, M., & Ozturk, I. (2022). Dynamic association between ICT, renewable energy, economic complexity and ecological footprint: Is there any difference between E-7 and G-7 countries? *Technology in Society*, 68, 101853. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101853>
- Huseynli, N. (2024). CO₂ emission and research and development relationship for Azerbaijan. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(1), 219–223. <https://doi.org/10.32479/ijeep.15203>
- Indri, M., Grau, A., & Ruderman, M. (2018). Special section on recent trends and developments in Industry 4.0 motivated robotic solutions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(4), 1677–1680.
- Jayashree, S., Reza, M. N. H., Malarvizhi, C. A. N., Maheswari, H., Hosseini, Z., & Kasim, A. (2021). The impact of technological innovation on Industry 4.0 implementation and sustainability: An empirical study on Malaysian small and medium sized enterprises. *Sustainability*, 13(18), 10115. <https://doi.org/10.3390/su131810115>
- Karre, H., Hammer, M., Kleindienst, M., & Ramsauer, C. (2017). Transition towards an Industry 4.0 state of the LeanLab at Graz University of Technology. *Procedia Manufacturing*, 9, 206–213.
- Khan, A., & Ximei, W. (2022). Digital economy and environmental sustainability: Do information communication and technology (ICT) and economic complexity matter? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 12301. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912301>
- Khan, B. (2023). CO₂ emissions and economic growth in some selected countries of ECOWAS: Panel data approach. *ECONOMICS—Innovative and Economics Research Journal*, 11(2), 245–256. <https://doi.org/10.2478/eoik-2023-0055>
- Kim, S. (2022). The effects of information and communication technology, economic growth, trade openness, and renewable energy on CO₂ emissions in OECD countries. *Energies*, 15(7), 2517. <https://doi.org/10.3390/en15072517>

- 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(14), 14328–14338.
- Li, W., Wang, W., Wang, Y., & Qin, Y. (2017). Industrial structure, technological progress and CO₂ emissions in China: Analysis based on the STIRPAT framework. *Natural Hazards*, 88(3), 1545–1564.
- Liu, X., Yuan, S., Yu, H., & Liu, Z. (2023). How ecological policy stringency moderates the influence of industrial innovation on environmental sustainability: The role of renewable energy transition in BRICST countries. *Renewable Energy*, 207, 194–204. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.045>
- Lu, W. C. (2018). The impacts of information and communication technology, energy consumption, financial development, and economic growth on carbon dioxide emissions in 12 Asian countries. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 23, 1351–1365. (DOI eksik.)
- Manglani, H., Kumar, M., & Sharma, A. (2025). Harnessing digital and ICT trade for environmental sustainability in emerging economies. *Discover Sustainability*, 6, Article 1153. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02029-4>
- Merdani, A., Streimikiene, D., Cavallaro, F., Loganathan, N., & Khoshnoudi, M. (2019). Carbon dioxide (CO₂) emissions and economic growth: A systematic review of two decades of research from 1995 to 2017. *Science of the Total Environment*, 649, 31–49. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.229>
- Naseem, S., Hu, X., Shi, J., Mohsin, M., & Jamil, K. (2023). Exploring the (...)impact of information communication technology and economic growth on CO₂ emissions in BRICS countries. *Optik*, 273, 170339. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.170339>
- Nejad, S. S., & Shirazi, F. (2022). ICT and environmental sustainability: A comparative study. *Sustainability*, 14, 8651. <https://doi.org/10.3390/su14148651>
- Nguyen, T. T., Pham, T. A. T., & Tram, H. T. X. (2020). Role of information and communication technologies and innovation in driving carbon emissions and economic growth in selected G-20 countries. *Journal of Environmental Management*, 261, 110162. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110162>

- Panayotou, T. (1993). *Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development* (Working Paper No. 238). International Labour Office, Technology and Employment Programme.
- Park, Y., Meng, F., & Baloch, M. A. (2018). The effect of ICT, financial development, growth, and trade openness on CO₂ emissions: An empirical analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 30708–30719. (DOI eksik.)
- Pesaran, M. H. (2004). *General diagnostic tests for cross section dependence in panels* (Cambridge Working Papers in Economics No. 0435). University of Cambridge. (Sayı/URL eksik olabilir.)
- Pesaran, M. H. (2006). Estimation and inference in large heterogeneous panels with a multifactor error structure. *Econometrica*, 74, 967–1012. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0262.2006.00692.x>
- Pesaran, M. H. (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of Applied Econometrics*, 22(2), 265–312. <https://doi.org/10.1002/jae.951>
- Pesaran, M. H. (2015). Testing weak cross-sectional dependence in large panels. *Econometric Reviews*, 34(6–10), 1089–1117. <https://doi.org/10.1080/07474938.2014.956623>
- Pesaran, M. H., Ullah, A., & Yamagata, T. (2008). A bias-adjusted LM test of error cross-section independence. *The Econometrics Journal*, 11, 105–127. <https://doi.org/10.1111/j.1368-423X.2007.00227.x>
- 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(2), 119187. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119187>
- Raihan, A., & Tuspekova, A. (2022). Role of economic growth, renewable energy, and technological innovation to achieve environmental sustainability in Kazakhstan. *Current Research in Environmental Sustainability*, 4, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100165>
- Raihan, A., Begum, R. A., Said, M. N., & Pereira, J. J. (2022). Relationship between economic growth, renewable energy use, technological innovation, and carbon emission toward achieving Malaysia's Paris Agreement. *Environmental Systems and Decisions*, 42, 586–607. (DOI eksik.)
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A complex view of Industry 4.0. *SAGE Open*, 6(2), 1–11. <https://doi.org/10.1177/2158244016653>

- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*. Boston Consulting Group. https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries (Erişim tarihi: 18 Nisan 2023)
- Tatoğlu, F. Y. (2012). *Panel veri ekonometrisi* (1. baskı). Beta Basım Yayım Dağıtım.
- United Nations Environment Programme. (2023). *Broken record: Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again): Emissions gap report 2023*. https://brasil.un.org/sites/default/files/2023-11/UNEP_EmissionsGapReport_EGR2023.pdf (Erişim tarihi: 22 Mart 2025)
- United Nations, General Assembly. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Development and international economic co-operation: Environment*. http://www.surdurulebilirlikalkinma.gov.tr/wp-content/uploads/2016/06/Development_and_International_Economic_Cooperation.pdf (Erişim tarihi: 19 Nisan 2023)
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. <https://sdgs.un.org/2030agenda> (Erişim tarihi: 15 Nisan 2023)
- Ünlü, U., Yıldırım, F., Kuloğlu, A., Ersoy, E., & Çetenak, E. H. (2022). Nexus between renewable energy, credit gap risk, financial development and R&D expenditure: Panel ARDL approach. *Sustainability*, 14(23), 16232. <https://doi.org/10.3390/su142316232>
- Wang, S., Zeng, J., & Liu, X. (2019). Examining the multiple impact of technological progress on CO₂ emissions in China: A panel quantile regression approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.046>
- Westerlund, J. (2008). Panel cointegration tests of the Fisher effect. *Journal of Applied Econometrics*, 23(2), 193–233. <https://doi.org/10.1002/jae.967>
- Xuan, V. N., Hoa, P. X., & Thu, N. T. P. (2025). Relationship between R&D investment, financial development, energy use, and carbon dioxide emissions in USA: New insights from ARDL methodology. *Cleaner Environmental Systems*, 19, 100362. (DOI eksik.)
- Yan, K., Gupta, R., & Wong, V. (2022). CO₂ emissions in G20 nations through the three-sector model. *Journal of Risk and Financial Management*, 15(9), 394. <https://doi.org/10.3390/jrfm15090394>

Zhang, Q., Shah, S. A. R., & Yang, L. (2022). Modeling the effect of disaggregated renewable energies on ecological footprint in E5 economies: Do economic growth and R&D matter? *Applied Energy*, 310, 118522. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118522>