

Dijitalleşmenin Çevresel Sürdürülebilirlik Üzerine Etkisi: N11 Ülkelerinden Kanıtlar¹

Ayşegül Han²

Emrah Eray Akça³

Özet

Dijitalleşme ve çevresel sürdürülebilirlik, günümüzde ekonomik kalkınma ve sosyal politika planlamasında kritik öneme sahip konular olarak öne çıkmaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik, doğal kaynakların mevcut kullanımını gelecek nesillerin ihtiyaçlarını tehlikeye atmadan yönetmeyi gerektirirken, dijitalleşme süreçlerinin çevresel çıktılar üzerindeki etkisi, özellikle gelişmekte olan ekonomilerde araştırılması gereken bir alan olarak dikkat çekmektedir. Bu çalışmada dijitalleşme ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki uzun dönemli ilişkinin 1997-2023 dönemi kapsamında N11 ülkeleri için incelenmesi amaçlanmaktadır. Araştırmada dijitalleşmeyi temsilen internet kullanan bireylerin toplam nüfus içerisindeki oranı, çevresel sürdürülebilirliği temsilen ise kişi başına düşen karbondioksit emisyonu dikkate alınmıştır. Ayrıca, ekonomik büyüme, enerji yoğunluğu ve kentleşme oranı değişkenleri ekonometrik modele kontrol değişkenler olarak dahil edilmiştir. Çalışmada yatay kesit bağımlılığı ve eğim heterojenliği dikkate alınarak Durbin-Hausman panel eşbütünleşme testi uygulanmış, değişkenler arasında uzun dönemli bir ilişkinin varlığı tespit edilmiştir. Ardından, Augmented Mean Group (AMG) ve Common Correlated Effects Mean Group (CCEMG) tahmincileri aracılığıyla uzun dönem katsayı tahminleri elde edilmiştir. Analiz bulguları, dijitalleşme düzeyindeki artışın N11 ülkelerinde karbon emisyonlarını artırdığını ortaya koymaktadır. Bu sonuç, dijital dönüşüm sürecinin enerji talebini ve üretim hacmini genişleterek çevresel baskıyı artıran bir dinamik etkisi yarattığını göstermektedir. Ekonomik büyüme değişkeni de tüm tahmincilerde pozitif ve

1 Bu çalışma 24-25 Ekim 2025 tarihlerinde çevrimiçi olarak düzenlenen 5. Uluslararası Dijital İşletme, Yönetim ve Ekonomi Kongresi'nde (ICDBME2025) özet hali sözlü bildiri olarak sunulan çalışmanın gözden geçirilmiş ve genişletilmiş halidir.

2 Dr., İnönü Üniversitesi, ORCID ID: 0000-0002-3390-2129

3 Doç. Dr., Bartın Üniversitesi, ORCID ID: 0000-0003-4190-5503

anamlı bulunmuş; bu durum, ekonomik büyümenin enerji tüketimi ve üretim faaliyetleri üzerinden emisyonları artırdığını doğrulamıştır. Enerji yoğunluğu değişkeninin pozitif ve anlamlı olması, enerji kullanımındaki artışın doğrudan karbon salınımlarını yükselttiğini ve enerji yapısının emisyon dinamiklerinde belirleyici bir unsur olduğunu göstermektedir. Buna karşın kentleşme oranı değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Bu durum, N11 ülkelerinde kentleşme düzeylerinin karbon emisyonları üzerindeki etkisinin belirgin ve tutarlı bir biçimde ortaya çıkmadığını göstermektedir. Çalışmanın genel bulguları, dijitalleşmenin N11 ülkelerinde mevcut koşullar altında çevresel sürdürülebilirliği destekleyen değil, karbon salınımlarını artıran bir unsur olarak işlediğini göstermektedir. Bu durum, dijital dönüşümün çevresel fayda yaratabilmesi için yeşil enerji politikaları, enerji verimliliği stratejileri ve çevre dostu teknolojik dönüşüm süreçleriyle desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca politika yapıcılarının dijitalleşme ve çevresel sürdürülebilirlik stratejilerini belirlerken ülkeye özgü iktisadi, kurumsal ve yapısal dinamikleri göz önünde bulundurmaları bu stratejik uygulamalardan etkin sonuçlar alınabilmesi bakımından önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dijitalleşme, Çevresel Sürdürülebilirlik, N11 Ülkeleri, Panel Veri Analizi.

GİRİŞ

Günümüzün en popüler kavramlarından birisi olan ve temelde iktisadi, sosyal ve çevresel unsurlardan oluşan “*sürdürülebilirlik*”, insani gereksinimler karşılanırken mevcut kaynakların etkin bir şekilde yönetimi yoluyla gelecek nesillerin ihtiyaç duyacağı kaynakların da güvence altına alınmasına işaret etmektedir. Sürdürülebilirliğin bu üç ayaklı bileşenleri entegre bir şekilde ele alınırken “çevresel sürdürülebilirlik” konusu yakın dönem konjonktüründe sıklıkla üzerinde durulan toplumsal bir amaç haline dönüşmüştür. Çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması noktasında birçok argüman ortaya koyulurken üretim, dağıtım ve tüketim süreçlerinde yaşanan dijital dönüşümler, “dijitalleşme” olgusunun çevresel sürdürülebilirlik bakımından önemini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda mevcut çalışmayla N11 (Bangladeş, Mısır, Endonezya, İran, Güney Kore, Meksika, Nijerya, Pakistan, Filipinler, Türkiye ve Vietnam) ülkelerindeki dijitalleşme süreçlerinin çevresel sürdürülebilirlik düzeyleri üzerine etkisinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Mevcut literatür incelendiğinde N11 ülkelerinin dijitalleşme düzeylerinin çevresel sürdürülebilirlikleri üzerindeki etkisini analiz eden herhangi bir ampirik çalışmaya rastlanmaması bu araştırmanın yürütülmesindeki temel motivasyon olmuştur. Bu açıdan literatüre katkıda bulunmayı amaçlayan bu çalışmanın birinci bölümünde dijitalleşme ve çevresel sürdürülebilirlik kavramları ve birbirleriyle etkileşim mekanizmaları teorik ve pratik boyutta ele alınmaktadır.

İkinci bölümde dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisine ilişkin mevcut ampirik çalışmalar değerlendirilmektedir. Analiz aşamasında incelenen model ile kullanılan veri seti ve yöntem üçüncü bölümde ele alınırken, dördüncü bölüm ampirik bulguların sunumuna tahsis edilmiştir. Çalışmamız analiz bulguları ışığında yapılan genel değerlendirmelerin ve çıkarımların yer aldığı beşinci bölümle tamamlanmaktadır.

1. DİJİTALLEŞME VE ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Küresel bazda ciddi bir endişeye dönüşen çevresel sürdürülebilirlik olgusu, insan faaliyetlerinin gezegen üzerinde yarattığı etkileri azaltmak için yenilikçi yaklaşımlara gereksinim duymaktadır (Saeed, 2021). Bu bağlamda Birleşmiş Milletler tarafından 2015'te kabul edilen Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinin temel rotalarından birisi, enerji ve doğal kaynakların sürdürülebilir bir şekilde yönetim ve kullanımını gerektiren değişim ve dönüşümler üzerine yoğunlaşmıştır. Çevresel sürdürülebilirliğin küresel ölçekte artan önemi bağlamında mal ve hizmet üretim ve tüketim süreçlerinin döngüsel bir yapıya kavuşturulması, çevre dostu mal ve hizmet talebinin artması, işletme faaliyetlerinin üretim süreçlerinde çevresel etkileri dikkate almaları ve kamu otoritelerinin katı çevresel politika düzenlemeleri dikkat çekmeye başlamıştır (Akandere, 2021). Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri paralelinde teşvik edilen, doğrusal ekonomi modelinden (kar odaklı ve üretim etkinliğinin hedeflendiği geleneksel model) döngüsel ekonomi modeline (atık miktarının asgariye indirildiği ve kaynaklarının sürdürülebilir kullanımının hedeflendiği model) geçişin temel ayağını atık miktarının azaltılması ve geri dönüşüm oluşturmaktadır. Çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla döngüsel ekonomiye geçiş başta olmak üzere bu ve buna benzer tüm uygulamalarda dijitalleşen teknoloji altyapısının sağladığı olanaklardan azami seviyede etkin bir şekilde faydalanılmasının önemi vurgulanmaktadır (Şimşek, 2024). Bununla birlikte dijitalleşen teknoloji altyapısındaki ilerlemeler her ne kadar ekonomik gelişme için avantaj yaratıyor gibi görünse de bu teknolojilerin çevresel ayak izi yarattığı göz ardı edilmemelidir. Zira dünyadaki karbon kaynaklı kirliliğin yaklaşık %3,7'sinin artan dijitalleşmeden kaynaklandığı ve 2013-2020 döneminde bu etkinin yaklaşık %70 oranında büyüdüğü ifade edilmektedir (Xu vd., 2022).

İş modellerini değiştirmek veya dönüştürmek ve yeni değerler yaratabilecek fırsatlar yakalamak için dijital teknolojilerin kullanımına işaret eden "*dijitalleşme*" kavramı, veriyi dijitale dönüştürmek gibi basit işlemlerin ötesinde tüm sistemi ve paydaşları etkileyen faktörleri kapsamaktadır. Buna göre dijitalleşme; dijital teknolojilerin tüm şirket faaliyetlerine entegrasyonuna, mevcut süreçlerin optimizasyon yoluyla daha efektif bir hale getirilmesine

ve operasyonel süreçlerin verimlilik artışlarına yardımcı olmaktadır (Feroz vd., 2021; Demirkıran vd., 2022; Yeşilyaprak ve Akıncı, 2025). Dijitalleşme süreci; akıllı şehir uygulamaları, enerji verimliliğini artırıcı dijital teknolojiler ve çevre dostu dijital çözümler gibi yollarla çevresel sürdürülebilirlik üzerinde pozitif yönlü etkiler yaratabilmektedir (Özkaya, 2025). Dijital teknolojilerin kaynak verimliliğinde artışa yol açması dolayısıyla enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltması gibi olumlu etkileri vasıtasıyla sosyo-ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği teşvik ettiğini belirten Tuna vd. (2024), dijital sürdürülebilirlik kavramının önemini vurgulamışlardır. Öte yandan dijital sürdürülebilirliğin başlıca kaynağı olan bilgi ve iletişim teknolojilerinin artan kullanımı, enerji tüketimi dolayısıyla sera gazı emisyon artışı gibi önemli çevresel etkiler yaratabilmektedir. Çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki bu negatif etkilerin ise Endüstri 4.0'ın önemli bileşenlerinden birisi olan bulut bilişim gibi modern dijital teknolojilerin kullanımı sayesinde azaltılabileceği belirtilmektedir (Saracel ve Aksoy, 2021). Endüstri 4.0 kapsamında dijital teknolojilerle entegre bir hale gelen üretim sistemlerinin yalnızca ekonomik fayda sağlamayıp aynı zamanda sürdürülebilirliğin sosyal ve çevresel boyutlarına ilişkin de önemli yansımaları olacağı üzerinde durulmaktadır (Leitoniene ve Kundeliene, 2021). Bu bakımdan işletmelerin, dijitalleşme ve sürdürülebilirlik kavramlarını birlikte dikkate alarak, dijital teknolojilerin entegre edildiği üretim sistemleriyle hedeflenen ekonomik kazançların sosyal/çevresel negatif dışsallıklar yaratmadan önceliklendirilmesi stratejisini benimsemelerinin gerekliliği vurgulanmaktadır (Özen vd., 2025).

Dijital dönüşüm, çevresel sürdürülebilirlik üzerinde doğrudan ve dolaylı etkiler yaratabilmektedir. Doğrudan etkiler bilgi ve iletişim teknolojileri donanımının üretimi, tüketimi ve imhası yoluyla ortaya çıkarken, dolaylı etkiler diğer alanlardaki bilgi ve iletişim teknolojilerinin sağladığı üretim ve tüketim modellerindeki değişiklikleri içermektedir (Bieser ve Hilty, 2018). Kapsamlı bir literatür incelemesi yapan Truong (2022), dijital dönüşümün çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki doğrudan ve dolaylı etkileri üzerinde durmuştur. Buna göre dijital malların üretimi, tüketimi ve imhası nedeniyle çevre üzerinde yarattığı baskıdan dolayı ortaya çıkan doğrudan etkiler, dijital dönüşümün kaynak tüketimine, su kıtlığına, sera gazı emisyonlarına ve hava kirliliğine yol açması ve biyoçeşitlilik üzerinde dikkate değer bir baskı yaratması bağlamında gerçekleşmektedir. Buna karşın dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki teşvik edici rolüne işaret eden dolaylı etkiler yoluyla dijital teknolojiler biyoçeşitliliğin korunmasına, temiz enerji kaynaklarının gelişimine ve doğal felaketlerin etkin bir şekilde yönetilmesine yardımcı olmaktadır.

Mevcut literatürü inceleyerek kavramsal bir araştırma yürüten Meydanoglu ve Hurmaci (2023), endüstriyel işletmelerdeki dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini, dijital teknolojilerin üretimi, kullanımı ve imhası olmak üzere üç ayrı kategoride sınıflandırarak açıklamışlardır. Buna göre dijital teknolojilerin üretimi için gerekli bazı materyaller (lityum, renyum vb.) doğada az miktarda bulundukları için artan dijitalleşme bu materyallerde talep artışına yol açacağından çevresel sürdürülebilirlik üzerinde olumsuz yansımaları olabilecektir. Yine bilgi ve iletişim teknolojileri donanımının üretimine bağlı olarak sera gazı emisyonu ve atık oluşumu ortaya çıkabilecektir. Dijital teknolojilerin kullanımı açısından değerlendirildiğinde, bilgi ve iletişim teknolojileri donanımındaki artışlar enerji tüketiminde artışı beraberinde getirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmaması halinde bu durum çevresel sürdürülebilirliği olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Dijital teknolojilerin imhası noktasında ise bazı yazılım ve donanım ürünlerinin dijital teknoloji kullanımı sayesinde daha uzun süre kullanılabilmesi ve bu sayede daha az atığın ortaya çıkması mümkün olabilmektedir. Dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki tüm bu olası olumsuz etkilerine karşın özellikle dijital teknolojilerin üretimiyle ilgili birçok pozitif etki de yaratabileceği belirtilmektedir: i) Akıllı enerji sistemlerinin kullanılması enerji tüketimi tahminlerinde sapmayı minimize edebilir, ii) Akıllı fabrikalarda ürünlerin, malzemelerin, enerjinin ve diğer tüm kaynakların dinamik kısıtlar altında daha verimli bir şekilde tahsisi mümkün olabilir, iii) Eklemeli üretim gibi yeni üretim teknolojileri kullanılarak üretim ve lojistik süreçlerinde atık ve israfın önüne geçilebilir, iv) Dijital teknolojiler sayesinde müşteri talebi mümkün olduğunca doğru tahmin edilerek fazla üretim ve gereksiz stokun önüne geçilebilir ve bu sayede enerji tasarrufu ile karbon emisyonunda azalma sağlanabilir, v) Dijital teknolojilerin lojistik sektörüne entegrasyonu ile gereksiz mal taşımacılığının önüne geçilebilir ve akıllı taşımacılık sistemleriyle yakıt tasarrufu sağlanarak karbon emisyonlarında ve hava kirliliğinde düşüş gerçekleştirilebilir, vi) *Zoom* ve *Google Meet* gibi çevrim içi toplantılara olanak tanıyan dijital teknolojiler sayesinde seyahat aktivitelerinin yol açtığı enerji tüketimi ve çevre kirliliğinin önüne geçilebilir, vii) Kağıda dayalı baskı ve yayın yerine dijital veri ve ürünlerin kullanılması sayesinde kağıt tüketimi azaltılarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunulabilir.

Küresel ısınma ve iklim değişikliği tartışmaları paralelinde doğal kaynak yönetiminin daha sürdürülebilir tarzda dizayn edilmesinin gerekliliği bağlamında tarım, sanayi, su yönetimi ve ulaşım gibi alanlarda akıllı dijital sistemlerin kullanılmaya başlandığını belirten Bilbay (2024), dijital teknolojilerin sağladıkları bu faydaların yanı sıra bazı çevresel bozulmalara

da yol açabileceğini ifade etmiştir. Dijital teknolojilerin üretimi ve kullanımı esnasında ortaya çıkan karbon ayak izi, elektronik atıkların yönetimi ve veri merkezlerinin artan enerji tüketim ihtiyaçları dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki olası negatif etkileri olarak sıralanmaktadır. Dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki net etkisi, doğrudan ve dolaylı etkilerinden hangisinin daha ağır bastığına bağlı olarak değişmektedir. Dijitalleşmenin özellikle verimlilik artışları kanalıyla çevresel sürdürülebilirlik üzerinde yaratacağı dolaylı pozitif etkilerinin, dijital teknolojilerin doğrudan üretimi, tüketimi ve imhası yoluyla çevresel sürdürülebilirlik üzerinde yaratacağı doğrudan negatif etkilerinden daha büyük olması durumunda dijitalleşme çevresel sürdürülebilirlik için teşvik edici bir unsur olarak değerlendirilebilir. Aksi durumda sürdürülebilirlik argümanları çerçevesinde stratejik kalkınma politikalarının odak noktası haline gelen dijital teknolojiler nihai durumda çevresel sürdürülebilirliğe karşı yönde bir işlev görebilmektedir. Bu argümanlar paralelinde gerçekleştirilen bu çalışmayla N11 ülkelerindeki dijitalleşme gelişmelerinin çevresel sürdürülebilirlikleri üzerindeki etkisi ampirik olarak incelenmektedir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Dijitalleşme ve çevresel sürdürülebilirlik bağlantısı üzerine mevcut literatür incelemesi, bu konuda yapılmış çalışmaların sayısının yetersizliğini ve araştırmaların özellikle son birkaç yılda yoğunlaştığını göstermektedir. Zira dijitalleşme ve sürdürülebilirlik kavramlarının birbirleri arasındaki etkileşimi bibliyometrik analiz yoluyla inceleyen Ömür (2025), sürdürülebilirlik ve dijital dönüşüm eksenli çalışmaların 2019 sonrası dönemde arttığı; 2024 sonrası ise çevresel sürdürülebilirlik ve dijital inovasyon odaklı çalışmalar üzerine yoğunlaştığı bulgusunu paylaşmıştır. Ayrıca dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasındaki rolünün belirlenmesine yönelik kavramsal çalışmaların gelişime açık olduğu belirtilmiştir.

Bir literatür çalışması yürüterek dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini imalat sanayi sektörü özelinde analiz eden Chen vd. (2020), imalat sanayi sektöründeki dijitalleşmenin ürün dönemleri boyunca Endüstri 4.0 teknolojileri kullanımı sağlaması sayesinde kaynak verimliliğini ve bilgi verimliliğini artırarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunduğu çıkarımında bulunmuşlardır. Buna karşın dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki negatif yönlü etkileri, kaynak ve enerji tüketimindeki artıştan, imalat sanayi kaynaklı atık ve emisyonlardan ve dijital donanımların imhasından kaynaklanmaktadır. Çin'in imalat sanayi sektöründe faaliyet gösteren geniş bir işletme örneklemini ele alan Wen vd. (2021), endüstriyel dijitalleşme ve işletmelerin çevresel performansı

arasındaki ilişkiyi analiz etmişlerdir. Çalışmadan elde edilen bulgular imalat sanayi sektöründeki işletmelerin endüstriyel dijitalleşme süreçleri boyunca çevresel performanslarını artırdıklarını göstermektedir. Buna göre endüstriyel dijitalleşme, yoğun kirlilik yaratıcı işletmelerin üretim ölçeklerini düşürerek, ürün yeniliğine yol açarak ve yeşil toplam faktör verimliliğini artırarak çevresel performansın gelişimine katkıda bulunmaktadır.

Dijitalleşme ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki etkileşimi, bu etkileşimin potansiyel faydaları ve riskleri bağlamında kapsamlı bir literatür incelemesi yoluyla analiz eden Saeed (2021), dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirliğe nasıl katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur. Buna göre dijital teknolojiler; çevresel koşulların daha doğru ve gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyan, veri toplama, izleme ve analiz etme konularında yeni araçlar ortaya çıkarmaktadır. Bu sayede karar alma süreçleri kısalmakta ve olumsuz çevre koşullarına karşı önceden tedbir alınabilmektedir. Ayrıca dijitalleşme kaynak yönetimi uygulamalarının optimizasyonunu mümkün kılmaktadır. Nesnelerin interneti ve akıllı cihazlar yoluyla enerji tüketimi izlenebilmekte ve kontrol edilebilmekte, atık yönetim sistemleri geliştirilebilmekte ve su kaynakları etkin bir şekilde kullanılabilir. Bununla birlikte çalışmada dijitalleşme ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki etkileşimin bazı riskleri de bünyesinde barındırdığı üzerinde durulmaktadır. Bunlar arasında elektronik atık üretimi, dijital teknoloji altyapısının artan enerji tüketimi ve dijital teknolojiye erişim olanaklarındaki farklılıklar yer almaktadır.

Dijital dönüşümü; yapay zeka, büyük veri analitiği, bulut bilişim sistemi ve nesnelerin interneti gibi dijital teknolojilerdeki ilerlemelerin toplumda, endüstrilerde ve kamu kurum/kuruluşlarında yol açtığı bozulmalar olarak tasvir eden Feroz vd. (2021), sistematik bir literatür incelemesi yoluyla dijital dönüşümün çevresel sürdürülebilirlik üzerinde yaratacağı olası negatif etkileri analiz etmişlerdir. Buna göre dijitalleşme; kirlilik kontrolü, atık yönetimi, sürdürülebilir üretim ve kentsel sürdürülebilirlik olmak üzere dört temel alanda çevresel sürdürülebilirlik üzerinde negatif dışsallıklar yaratabilmektedir. Benzer bir prosedür takip ederek dijital dönüşümün çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki pozitif ve negatif etkilerini analiz eden Truong (2022)'un bulgularına göre atık yönetimi ve kullanımı, kirlilik önleme ve kontrol ile sürdürülebilir kaynak yönetimi olmak üzere üç alanda dijital dönüşümün çevresel sürdürülebilirliği pozitif yönde etkilediği anlaşılmaktadır. Buna göre yapay zeka, büyük veri, nesnelerin interneti ve bulut bilişim gibi dijital teknolojilerin gelişmesi sayesinde çevresel bozulmaların önüne geçilebilmektedir. 2005-2020 döneminde Türkiye'deki dijital dönüşüm sürecinin verimlilik üzerindeki etkilerini teorik ve pratik açılardan yapay sinir ağları ile inceleyen Demirkıran vd. (2022),

dijitalleşmenin verimlilik artışı yaratması dolayısıyla sürdürülebilir kalkınma hedeflerine hizmet ettiği bulgusuna ulaşmışlardır. Daha spesifik olarak belirtmek gerekirse, dijitalleşmenin bir getirisi olarak e-Devlet hizmetlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasının karbon emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağladığı ifade edilmiştir. Bu bağlamda kamu hizmetlerinin mümkün olduğunca internet aracılığıyla çevrimiçi sistemler üzerinden gerçekleştirilmesi yoluyla kaynak israfının ve çevresel bozulmanın önüne geçilebilecek ve emisyon oranı düşük yeni teknolojilerin kullanımıyla emek verimliliği artırılarak sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunulabilecektir.

Birleşik Krallık'ın 1990-2020 dönemi verilerini kullanarak dijitalleşme ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki bağlantıyı enerji tüketiminin aracılık etkisini dikkate alarak analiz eden Zulfiqar vd. (2023), dijitalleşmenin ve çevresel sürdürülebilirliğin farklı türde göstergelerini dikkate almışlardır. Buna göre internet kullanıcıları ve teknolojik ilerleme (sabit telefon aboneliği ve hücresel veri) ile ekolojik ve karbon ayak izleri arasında negatif yönlü bir ilişki bulunmaktadır. Ekolojik ve karbon ayak izlerinde artışa yol açan enerji tüketimi ise internet kullanıcıları ve teknolojik ilerlemenin ekolojik ve karbon ayak izleri üzerindeki önleyici etkilerini tersine çevirmektedir. Çin'in 30 eyaletine ait 2006-2017 dönemi panel verilerini kullanarak internet gelişiminin çevre kalitesi üzerindeki etkisini analiz eden Ren vd. (2023), çevre kirliliğinin önemli bir mekansal yayılma etkisine sahip olduğu bulgusuna ulaşmışlardır. Buna göre internetin gelişimi sadece Çin'in ilgili eyaletindeki çevresel kirliliği azaltmakla kalmamakta aynı zamanda çevresindeki komşu eyaletlerin çevre kalitesinde de artışa yol açmaktadır. Ayrıca internet gelişiminin teknolojik inovasyonu teşvik etmesi, endüstriyel faaliyetlerde iyileşmeye yol açması, beşeri sermayeyi artırması ve finansal gelişmeyi teşvik etmesi yoluyla çevre kalitesinin artmasına katkıda bulunduğu bulgusu paylaşılmıştır. Bu bağlamda dijitalleşmenin önemli bir göstergesi olan internet gelişiminin çevre kirliliğini önleyerek çevresel sürdürülebilirliğe hizmet ettiği çıkarımında bulunulabilir. 2000-2020 dönemi kapsamında Çin'in 28 eyaleti için ekonomik belirsizlik, dijitalleşme ve çevresel sürdürülebilirlik etkileşimini analiz eden Teng vd. (2023), dijitalleşme ve karbondioksit emisyonları arasında istatistiki olarak anlamlı negatif yönlü bir ilişki tespit etmişlerdir. Bu sonuç, dijitalleşmenin enerji verimliliğini artırma ve sürdürülebilir uygulamaları teşvik etme noktasında dönüştürücü bir role sahip olduğu şeklinde yorumlanmaktadır. Avrupa Birliği üyesi 23 ülkenin 2000-2017 dönemi panel verilerini kullanan Adeshola vd. (2024), bilgi ve iletişim teknolojileri yoluyla ortaya çıkan dijitalleşmenin ve çevre vergilerinin sera gazı emisyonları üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Araştırma bulguları

bilgi ve iletişim teknolojilerindeki gelişimin ve çevre vergilerinin çevresel sürdürülebilirliği teşvik ettiğini, buna karşın kişi başına milli gelirdeki ve araştırma-geliştirme yatırımlarındaki artışların çevresel sürdürülebilirliği olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Bunun yanı sıra çalışmada bilgi ve iletişim teknolojileri ile sera gazı emisyonları arasındaki ilişkinin çevre vergilerinin düzeyine bağlı olarak değişim sergilediği bilgisine yer verilmiştir. Buna göre ancak çevre vergilerinin belirli bir eşik değerin üzerine çıkması durumunda bilgi ve iletişim teknolojilerinin kullanımı sera gazı emisyonunda ve dolayısıyla çevresel sürdürülebilirlikte iyileşmeye yol açabilecektir.

Dijital teknolojiler ve sürdürülebilirlik kapsamında uluslararası yayınlanan raporları ve eylem planlarını inceleyen Şimşek (2024) yeni bir iş modeli önermiştir. Buna göre atık yönetim süreçlerinin dijital teknolojilerle desteklenmesi ve optimizasyonunun sağlanması, atıkların kaynaklarında ayrıştırılması ve yeniden kullanıma dönüştürülmesi önem taşımaktadır. Önerilen bu modelde atık yönetimi konusunda vatandaşlar arasında toplumsal bilincin oluşturulması yoluyla atık üretiminin azaltılması ve sıfır atık hedefine katkı sağlanması öngörülmektedir. Yeni iş modeli, dijital teknolojilerin kullanımı sayesinde atık yönetimi ve sürdürülebilirlikle ilgili bilinçlenmenin yaygınlaştırılmasına ve kaynakların daha verimli kullanılmasına işaret etmektedir. Bu sayede de mal ve hizmet üretim ve tüketim faaliyetlerinin çevresel olumsuz etkilerinin azaltılmasının mümkün olabileceği ifade edilmektedir. Lojistik sektörünün dijitalleşmesinin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini inceleyen Yeşilyaprak ve Akıncı (2025), dijital teknolojilerin ve veri analitiğinin yaygın kullanımı sayesinde lojistik süreçlerin daha verimli ve çevre dostu bir yapıya kavuşabileceği çıkarımında bulunmuşlardır. Burada dijitalleşmenin, taşıma robotlarının optimizasyonu sayesinde lojistikte verimliliği artırması yoluyla araç kullanımını ve karbon ayak izini azalttığına vurgu yapılmaktadır. Bunun yanı sıra akıllı envanter yönetim sistemlerinin lojistik sektörüne entegrasyonunun stok seviye belirleme tahminlerindeki sapmaları önlemesi sebebiyle fazla veya atık stokların önüne geçebileceği ve yeşil dönüşüm, yeşil ambalajlama, enerji verimliliği gibi alanlarda çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayabileceği üzerinde durulmaktadır.

3. AMPİRİK KURGU: MODEL, VERİ SETİ VE METODOLOJİ

Çalışmanın bu kısmında öncelikle dijitalleşme ve çevresel sürdürülebilirlik bağlantısının analizinde incelenen model ve veri seti tanıtılmakta, ardından analiz sürecinde takip edilen metodolojiye dair açıklamalarda bulunulmaktadır.

3.1. Model

Bu çalışmada dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini incelemek amacıyla kurulan ekonometrik model Denklem (1)'de gösterilmektedir:

$$LnCO2_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DJT_{it} + \alpha_2 LnGDP_{it} + \alpha_3 LnENERJI_{it} + \alpha_4 KENT_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

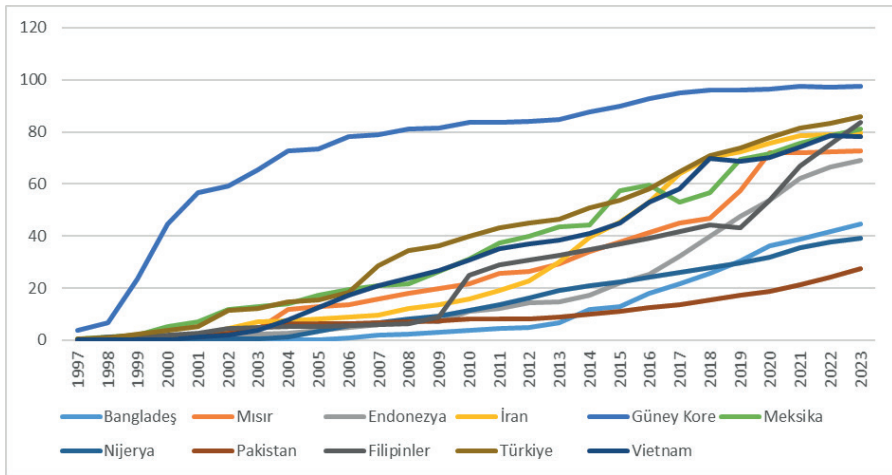
Denklem (1)'de bağımlı değişken CO₂, çevresel sürdürülebilirliği temsilen toplam karbondioksit emisyonunu ifade etmektedir. Temel bağımsız değişken olan DJT, dijitalleşmeyi temsilen toplam nüfus içinde internet kullanan bireylerin oranını (%) göstermektedir. Modelin açıklayıcı gücünü artırmak ve olası sapmaları azaltmak amacıyla literatürde sıkça kullanılan üç kontrol değişken modele dahil edilmiştir. Bu değişkenler; ekonomik büyümeyi temsilen sabit 2015 ABD doları cinsinden gayrisafi yurtiçi hasıla (GDP), enerji yoğunluğu değişkenini temsilen ekonomik çıktı başına enerji kullanımı (ENERJI) ve kentleşme düzeyini temsilen kentsel nüfus oranı (KENT) şeklindedir. Modelde (i) ve (t) sırasıyla yatay kesit (ülke) ve zaman (yıl) boyutlarını göstermektedir. $\alpha_1 - \alpha_4$ parametreleri tahmin edilecek katsayıları, ε_{it} ise hata terimini ifade etmektedir. Analizde, karbon emisyonu, ekonomik büyüme ve enerji yoğunluğu değişkenini temsil eden değişkenler logaritmik forma dönüştürülmüş, diğer değişkenler ise doğal değerleriyle analize dahil edilmiştir.

3.2. Veri Seti

Çalışmada, 1997-2023 dönemine ait N11 ülkeleri (Bangladeş, Mısır, Endonezya, İran, Güney Kore, Meksika, Nijerya, Pakistan, Filipinler, Türkiye ve Vietnam) için elde edilen yıllık veriler kullanılmıştır. N11 ülkeleri, son çeyrek yüzyılda sergiledikleri yüksek ekonomik büyüme potansiyeli, hızla gelişen dijital altyapı yatırımları ve buna paralel olarak artan çevresel baskılar nedeniyle, dijitalleşme ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki dinamik ilişkiyi incelemek için uygun bir örneklem grubunu temsil etmektedir. Bu ülkeler, hem sanayileşme sürecini tam anlamıyla tamamlamamış olmaları hem de dijital dönüşüm süreçlerini hızla benimsemeleri açısından, gelişmiş ve gelişmekte olan ekonomiler arasındaki yapısal farklılıkları yansıtan dengeli bir ara kategori oluşturmaktadır. Veri seti, N11 grubundaki tüm ülkeleri kapsamakta olup, 27 yıllık dönem boyunca toplam 297 gözlemden oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan tüm değişkenler, Dünya Bankası'nın Dünya Kalkınma Göstergeleri (WB-WDI, 2025) veri tabanından elde edilmiştir. Analiz döneminin seçimi, hem dijitalleşme süreçlerinin küresel

ölçekte ivme kazandığı hem de çevresel sürdürülebilirliğin uluslararası politika gündeminde öncelik kazandığı yılları kapsamaktadır. 1990'lı yılların sonlarından itibaren bilgi ve iletişim teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, internet kullanımının yaygınlaşması, dijital hizmet sektörlerinin büyümesi ve dijital altyapı yatırımlarındaki artışla birlikte çevresel etkilerin daha görünür hale gelmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda bu dönem, Kyoto Protokolü'nün ikinci taahhüt dönemi, Paris Anlaşması'nın yürürlüğe girmesi ve Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinin ulusal politika belgelerine entegre edilmesi gibi önemli küresel çevre politikalarının uygulamaya konulduğu bir dönemi temsil etmektedir. Dolayısıyla, seçilen dönem hem dijital dönüşümün hızlandığı hem de çevresel sürdürülebilirlik çabalarının yoğunlaştığı bir zaman dilimini kapsamaktadır.

Şekil 1, 1997-2023 dönemi boyunca N11 ülkelerinde dijitalleşmenin gelişimini göstermektedir. Buna göre, dijitalleşme eğilimlerinin ülkeler arasında belirgin biçimde farklılaştığı görülmektedir. Güney Kore, yüksek teknoloji yatırımları ve güçlü dijital politika stratejileri sayesinde dönemin başından itibaren hızlı bir yükseliş göstermekte ve neredeyse tam dijital kapsayıcılığa ulaşmaktadır. Bu bakımdan Güney Kore'yi Türkiye takip ederken, Meksika, İran, Endonezya ve Mısır gibi ülkeler özellikle 2010 sonrasında geniş bant internet altyapısına yapılan yatırımlar ve mobil teknolojilerin yaygınlaşmasıyla dijitalleşmede önemli ilerlemeler kaydetmişlerdir. Öte yandan, Bangladeş, Nijerya ve Pakistan gibi ülkelerde dijitalleşme süreci daha yavaş ilerlemektedir. Altyapı yetersizlikleri, düşük gelir düzeyleri ve sınırlı dijital erişim olanakları, bu ülkelerde dijital dönüşümün hızını kısıtlayan temel unsurlar arasında yer almaktadır.



Şekil 1. N11 ülkelerinde dijitalleşmenin ilerlemesi (1997-2023)

Kaynak. Dünya Bankası-Dünya Kalkınma Göstergeleri (2025).

Çalışmada kullanılan değişkenlere ilişkin tanımlayıcı istatistiklerin sunulduğu Tablo 1, veri setinin genel eğilimleri hakkında ön bilgi sunmaktadır. Buna göre değişkenlerin ortalama, maksimum ve minimum değerleri incelendiğinde N11 ülkeleri arasında ekonomik ve çevresel açıdan gözlenen heterojenlik dikkat çekmektedir.

Tablo 1. Tanımlayıcı istatistikler

	CO2	DJT	GDP	ENERJİ	KENT
Ortalama	285.452	29.195	5.13E+11	89.208	52.571
Medyan	227.046	19.000	3.79E+11	77.465	46.135
Maksimum	778.802	97.600	1.76E+12	227.112	81.936
Minimum	23.955	0.0007	7.20E+10	37.666	22.438
Std. Sapma	195.866	28.685	3.96E+11	40.114	18.513
Jarque-Bera	26.183	37.555	71.08044	171.064	26.116

Tanımlayıcı istatistiklere göre ortalama karbon emisyonu 285,45 milyon ton olup, bu değer ülkelerin ekonomik büyümeleri ve enerji kullanım düzeylerindeki farklılıkları yansıtmaktadır. En yüksek karbon emisyonu değeri, 778.80 milyon ton ile fosil yakıta dayalı üretim yapısının baskın olduğu İran'da görülürken, en düşük değer 23.96 milyon ton ile Bangladeş'te kaydedilmiştir. Dijitalleşme düzeyini gösteren internet kullanım oranının ortalaması ise %29.19 olarak hesaplanmıştır. Bu oran N11 ülkelerinde dijital dönüşüm sürecinin hala düşük bir seviyede olduğunu göstermektedir. Bu bakımdan N11 ülkeleri arasında belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Nitekim en yüksek dijitalleşme oranı %97.60 ile neredeyse tam dijital kapsayıcılığa ulaşan Güney Kore'yi, en düşük oran olan %0.0007 ise dijitalleşmenin henüz başlangıç aşamasında olduğu Bangladeş'i temsil etmektedir. Ekonomik büyüme değişkeninin ortalaması 513 milyar ABD doları, maksimum değeri 1 trilyon 760 milyar ABD doları ve minimum değeri 72 milyar ABD dolarıdır. Enerji kullanımı değişkeninin ortalaması 89.21 kilogram petrol eşdeğeri olup, maksimum değeri 227.11 ve minimum değeri 37.67 olarak hesaplanmıştır. Bu farklılık, ülkeler arasında enerji yoğunluğu düzeylerinde belirgin bir ayrışma olduğunu göstermektedir. Kentsel nüfus oranının ortalaması 52.57, maksimum değeri 81.94 ve minimum değeri 22.44'tür. Bu dağılım, N11 ülkelerinde kentleşme sürecinin farklı aşamalarda bulunduğunu ve dijitalleşme ile çevresel sürdürülebilirlik ilişkisini şekillendiren önemli demografik bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır.

3.3. Yöntem

Panel regresyon modellerinde dikkat edilmesi gereken temel unsurlardan biri, yatay kesitler arasındaki bağımlılığın araştırılmasıdır. Bu adım, modelden elde edilen sonuçların güvenilir biçimde yorumlanabilmesi açısından bir ön koşul niteliği taşımaktadır. Kesitler arasında bağımlılık olup olmadığını belirlemek amacıyla farklı testler geliştirilmiş olup, örneklem büyüklüğüne bağlı olarak panelin zaman boyutu (T) ve kesit boyutu (N) test seçiminde belirleyici olmaktadır. Bu çalışmada panelin yapısı dikkate alınarak, hata terimleri arasındaki korelasyonları inceleyen Lagrange Çarpımı (LM) testi uygulanmıştır. Her bir kesitin hata terimleri arasındaki korelasyonların varlığını test eden LM testinin istatistik değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır (Breusch ve Pagan, 1980):

$$LM = T \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \hat{\rho}_{ij}^2 \quad (2)$$

Burada $\hat{\rho}_{ij}^2$, i ve j kesitlerinin hata terimleri arasındaki korelasyon katsayısını göstermektedir. Test istatistiği, hata terimleri arasında korelasyon olmadığı varsayımı altında asimptotik olarak χ^2 dağılımını izlemektedir. Bu sayede panelde yatay kesit bağımlılığın varlığı tespit edilerek, ilerleyen analizler için modelin doğruluğu sağlanmaktadır.

Yatay kesit bağımlılığın tespit edilmesinin ardından, panel modellerinde dikkate alınması gereken ikinci önemli adım, eğim katsayılarının homojenliğinin sınanmasıdır. Bu test, tahmin edilen katsayıların kesitler (ülkeler) arasında farklılık gösterip göstermediğini belirlemekte ve böylece modeldeki yapısal benzerlik düzeyini ortaya koymaktadır. Bu amaçla, Pesaran ve Yamagata (2008) tarafından geliştirilen Delta testi uygulanmıştır. Söz konusu test, özellikle büyük örneklem için eğim heterojenliğini değerlendirmede sıkça kullanılmaktadır. Ancak bu çalışmadaki örneklem boyutu görece sınırlı olduğundan hem orijinal Delta testi hem de düzeltilmiş Delta testi kullanılmıştır. Testler sırasıyla şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\ddot{A} = \sqrt{N} \left(N^{-1} S \tilde{W} - \frac{n}{2n} \right) \sim \chi^2 \quad (3)$$

$$\ddot{A}_{adj} = \sqrt{N} \left(N^{-1} S \tilde{W} - \frac{n}{v(T, n)} \right) \sim N(0, 1) \quad (4)$$

Burada $S\tilde{W}$ eğim heterojenliğinin ölçeğini, n parametre sayısını, $v(T, n)$ örneklem varyansını, Δ test istatistiğini ve Δ_{adj} düzeltilmiş test istatistiğini göstermektedir.

Kesit bağımlılığı ve eğim heterojenliği tespit edildikten sonra, panel veri analizinin bir sonraki aşamasında değişkenlerin durağanlık özellikleri incelenmektedir. Bu aşama, modelden elde edilen tahminlerin güvenilirliği açısından temel bir adımdır. Panel veri setleri hem yatay kesit (ülke) hem de zaman (yıl) boyutlarını içerdiğinden, serilerin durağan olup olmadığının belirlenmesi analiz sonuçlarının istikrarı açısından önem taşımaktadır. Durağanlık analizine geçmeden önce kesit bağımlılığı test edilmekte, zira panelde ortak şokların varlığı birim kök testi seçiminde belirleyici olmaktadır. Eğer seriler arasında yatay kesit bağımlılığı varsa ikinci nesil birim kök testleri, bağımlılık bulunmadığında ise birinci nesil testler tercih edilmektedir. Bu metodolojik ayrım, panel birimleri arasındaki karşılıklı etkileşimin göz ardı edilmemesini sağlayarak elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırmaktadır. Bu çalışmada, yatay kesit bağımlılığının varlığı dikkate alınarak, öncelikle ikinci nesil panel birim kök testlerinden CIPS (Cross-sectionally Augmented IPS) testi uygulanmıştır. Pesaran (2007) tarafından geliştirilen bu test, panel veri setlerinde serilerin birim kök içerip içermediğini analiz etmekte ve ortak faktörlerin varlığını dikkate alarak geleneksel testlere kıyasla daha tutarlı sonuçlar sunmaktadır. CIPS testi, her bir yatay kesit için hesaplanan CADF (Cross-sectionally Augmented Dickey-Fuller) istatistiklerinin ortalaması alınarak elde edilmektedir:

$$CIPS = N^{-1} \sum_{i=1}^N CADF_i \quad (5)$$

Burada N paneldeki toplam ülke sayısını, $CADF_i$ ise her bir ülkeye ait CADF test istatistiğini ifade etmektedir. Bu yöntem, panelin tüm gözlemleri için ortak bir birim kök testi sonucu sunmakta ve serilerin genel olarak durağan olup olmadığını belirlemeye olanak tanımaktadır. CIPS istatistiği belirli kritik değerlerle karşılaştırılarak, serinin durağan (H_0) veya birim kökklü (H_1) yapıda olup olmadığına karar verilmektedir.

Panel veri setinin durağanlık özelliklerini daha kapsamlı biçimde değerlendirebilmek amacıyla, CIPS testine ek olarak birinci nesil panel birim kök testlerinden Levin, Lin ve Chu (2002) [LLC] ile Im, Pesaran ve Shin (2003) [IPS] testleri de uygulanmıştır. Bu testler, panel veri literatüründe yaygın kullanılan klasik yöntemler olup, serilerin zaman içinde istatistiksel

olarak sabit bir ortalama etrafında dalgalanıp dalgalanmadığını analiz etmektedir.

Tüm panel birimlerinin ortak bir otoregresif katsayıya sahip olduğu varsayımı altında çalışan LLC testinin gösterimi aşağıdaki biçimdedir:

$$\Delta y_{it} = \alpha_i + \rho y_{i(t-1)} + \sum_{j=1}^p \beta_{ij} \Delta y_{i(t-j)} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

Bu denklemde y_{it} analiz edilen seriyi, ρ ortak otoregresif katsayıyı, α_i bireysel sabit terimi ve ε_{it} hata terimini göstermektedir. LLC testinin sıfır hipotezi (H_0), serinin birim kök içerdiği yani durağan olmadığı yönündedir; alternatif hipotez (H_1) ise serinin durağan olduğunu ifade etmektedir. Bu test, özellikle yüksek korelasyon düzeyine sahip panellerde güçlü sonuçlar üretmesiyle öne çıkmakta, ancak katsayı homojenliği varsayımı nedeniyle bazı kısıtlar taşımaktadır.

IPS testi ise LLC testine göre daha esnek bir yapıya sahiptir ve her panel biriminin kendi otoregresif katsayısına (ρ_i) sahip olmasına izin vermektedir. Böylece yatay kesitler arasında heterojen dinamiklerin varlığı dikkate alınmaktadır. IPS testinin temel denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\Delta y_{it} = \alpha_i + \rho_i y_{i(t-1)} + \sum_{j=1}^p \beta_{ij} \Delta y_{i(t-j)} + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

Bu testte bireysel Dickey-Fuller regresyonlarından elde edilen t-istatistiklerinin ortalaması alınarak genel bir panel istatistiği hesaplanmaktadır. Sıfır hipotezi (H_0), tüm serilerin birim kök içerdiği; alternatif hipotez (H_1) ise paneldeki en az bir birimin durağan olduğu yönündedir. IPS testi bu özelliğiyle, heterojen panellerde durağanlık analizinde LLC'ye göre daha gerçekçi ve esnek bir alternatif sunmaktadır.

Birim kök testi sonuçları, modelde yer alan değişkenlerin aynı bütünleşme derecesine sahip olduğunu ve dolayısıyla aralarında uzun dönemli bir ilişkinin (eşbütünleşme) araştırılmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Panel veri analizinde kullanılacak eşbütünleşme testinin seçimi, kesitler arası bağımlılık ve heterojenlik özelliklerinin varlığına bağlıdır. Nitekim kesitler arasında ortak şokların bulunduğu ve panel birimlerinin birbirinden yapısal olarak farklılaştığı durumlarda, birinci nesil eşbütünleşme testleri uzun dönemli ilişkileri doğru biçimde tespit edememekte ve sapmalı sonuçlar üretebilmektedir. Bu metodolojik sınırlılıklar doğrultusunda, çalışmada hem

kesit bağımlılığını hem de eğim heterojenliğini dikkate alan ikinci nesil bir panel eşbütünleşme testi tercih edilmiştir. Bu kapsamda, Westerlund (2008) tarafından geliştirilen Durbin-Hausman (DH) panel eşbütünleşme testi uygulanmıştır. Westerlund (2008) yaklaşımı, geleneksel testlerin aksine, paneldeki ortak faktör yapısını dikkate alarak hem grup bazlı (ülke düzeyinde) hem de panel geneli (tüm örneklem) için uzun dönemli ilişkilerin varlığını sınamaktadır. Böylece test, ülkeler arasında farklı hızlarda gerçekleşebilen dinamik süreçleri hesaba katarak daha güvenilir sonuçlar üretmektedir.

Durbin-Hausman testi, hata terimlerinin bir dönem gecikmeli değerlerine dayalı olarak, tahmin edilen uzun dönem katsayılarının farklarını ölçmektedir. Grup bazlı ve tüm panel için hesaplanan test istatistikleri sırasıyla şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$DH_g = \sum_{i=1}^n \hat{S}_i (\tilde{\phi}_i - \hat{\phi}_i)^2 \sum_{t=2}^T \hat{e}_{it-1}^2 \quad (8)$$

$$DH_p = \hat{S}_n (\tilde{\phi} - \hat{\phi})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{t=2}^T \hat{e}_{it-1}^2 \quad (9)$$

Burada, $\hat{S}_i$ ve $\hat{S}_n$ ölçeklendirme faktörlerini, $\tilde{\phi}_i$ ve $\hat{\phi}_i$ tahmin edilen uzun dönem katsayılarını, $\hat{e}_{it-1}$ ise hata terimlerinin bir dönem gecikmeli değerlerini ifade etmektedir.

Westerlund (2008), bu istatistiklerin asimptotik dağılımını standart normal biçimde tanımlayarak, testin hem grup hem de panel düzeyinde geçerli sonuçlar üretmesini sağlamıştır. Böylece, panel birimleri arasında ortak şokların varlığında dahi uzun dönemli ilişkilerin tespiti mümkün hale gelmiştir. Bu bağlamda, Durbin-Hausman testi, N11 ülkeleri örnekleminde dijitalleşme, enerji kullanımı ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki uzun dönemli denge ilişkilerini belirlemede metodolojik açıdan uygun araç olarak değerlendirilmiştir.

Eşbütünleşme ilişkisinin tespit edilmesinin ardından, çalışmanın bir sonraki aşamasında uzun dönem katsayılarının güvenilir biçimde tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Daha önceki aşamalarda tespit edilen yatay kesit bağımlılığı ve eğim heterojenliği özellikleri dikkate alındığında, birinci nesil uzun dönem katsayı tahmincileri sapmalı ve tutarsız sonuçlar üretebilmektedir (O'Connell, 1998). Bu nedenle, ortak faktör yapısını ve heterojenliği aynı anda dikkate alabilen ikinci nesil panel tahmin yöntemleri tercih edilmiştir. Bu kapsamda öncelikle, Pesaran (2006) tarafından geliştirilen Common Correlated Effects Mean Group (CCEMG) tahmincisi kullanılmıştır.

CCEMG yöntemi, gözlemlenemeyen ortak faktörlerin etkisini kontrol edebilmek amacıyla, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin panel ortalamalarını modele dahil ederek ülkeler arasında ortak şoklardan veya küresel faktörlerden kaynaklanan eşanlı bağımlılık etkilerini gidermekte ve katsayı tahminlerinin sapmasız olmasını garanti altına almaktadır. CCEMG tahmincisinin genel gösterimi şu şekildedir:

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta_i X_{it} + \gamma_i \bar{Y}_t + \delta_i \bar{X}_t + c_i f_t + \varepsilon_{it} \quad (10)$$

Burada Y_{it} ve X_{it} sırasıyla bağımlı ve bağımsız değişkenleri, f_t gözlemlenemeyen ortak faktörü, $\bar{Y}_t$ ve $\bar{X}_t$ ise değişkenlerin panel ortalamalarını ifade etmektedir. Bu yapı sayesinde, CCEMG tahmincisi kesit bınlılığı ve eğim heterojenliği varlığında dahi tutarlı ve sağlam sonuçlar üretebilmektedir.

CCEMG tahmincisine ek olarak, Eberhardt ve Bond (2009) ile Eberhardt ve Teal (2010) tarafından geliştirilen Augmented Mean Group (AMG) tahmincisi de kullanılmıştır. Paneldeki ortak dinamik etkileri dikkate alarak zaman içinde tüm kesitleri etkileyen şokları modele entegre eden AMG yönteminde, ilk aşamada sabit etkili bir regresyonun birinci farkı alınarak ortak zaman eğilimi tahmin edilmekte; daha sonra bu dinamik bileşeni her bir ülke denkleminde ekleyerek ülke bazında regresyonlar tahmin edilmektedir. AMG tahmincisinin genel formu şu şekildedir:

$$\Delta Y_{it} = \alpha_i + \beta_i \Delta X_{it} + \sum_{t=1}^T \theta_t D_t + \phi_i f_t + \varepsilon_{it} \quad (11)$$

Burada Δ fark operatörünü, D_t zaman kuklalarını ve θ_t ortak dinamik süreci temsil etmektedir. Elde edilen ülke bazlı katsayıların (β_i) ortalaması alınarak panel geneline ilişkin uzun dönem katsayıları hesaplanmaktadır. Bond ve Eberhardt (2013) tarafından yapılan Monte Carlo simülasyonları, AMG tahmincisinin farklı örneklem büyüklükleri (N ve T) altında hem yanlılık hem de etkinlik açısından güçlü sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu özellikleri nedeniyle AMG yöntemi hem heterojenlik hem de gözlemlenemeyen ortak etkiler içeren paneller için en uygun uzun dönem tahmincilerinden biri olarak kabul edilmektedir.

4. AMPİRİK BULGULAR

Analiz sürecinde öncelikle incelenen değişkenler arasında ülkeler arası ortak şokların veya karşılıklı etkileşimlerin varlığını tespit etmek amacıyla yatay kesit bağımlılık testi uygulanmıştır. Tablo 2’de sunulan sonuçlara göre tüm değişkenler için sıfır hipotezi reddedilmiş ve seriler arasında yatay kesit bağımlılığı olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 2. Yatay kesit bağımlılık testi sonuçları

	LnCO2	DJT	LnGDP	LnENERJI	KENT
Test					
İstatistiği	1115.934*	1264.05*	1420.736*	838.896*	963.738*
Olasılık					
Değeri	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

*Not. * sembolü %1 anlamlılık düzeyini belirtmektedir.*

Yatay kesit bağımlılığının tespit edilmesinin ardından paneli oluşturan ülkelerin parametrelerinin birbirine benzer olup olmadığını incelemek amacıyla eğim homojenliği testi uygulanmıştır. Tablo 3’te yer alan sonuçlara göre her iki testte de sıfır hipotezi reddedilmiş ve modelde eğim heterojenliğinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 3. Eğim homojenliği test sonuçları

	Test-stat.	Prob.
Δ	14.46*	0.000
Δ_{adj}	16.396*	0.000

*Not. * sembolü %1 anlamlılık düzeyini belirtmektedir.*

Yatay kesit bağımlılığı ve eğim heterojenliği sonuçlarına göre yatay kesitler arasında ortak şokların ve farklı dinamik yapıların bulunduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, serilerin durağanlık özelliklerini incelemek için ikinci nesil panel birim kök testlerinin kullanılması uygun görülmüştür. Bu kapsamda Pesaran (2007) tarafından geliştirilen CIPS testi uygulanmıştır. Ayrıca, bulguların sağlamlığının kontrol edilmesi amacıyla LLC ile IPS testlerinden yararlanılmıştır. Tablo 4’te sunulan bulgulara göre modelde yer alan değişkenlerin düzey değerlerinde durağan olmadıkları, ancak birinci farkları alındığında durağan hale geldikleri tespit edilmiştir. Bu sonuç, serilerin I(1) düzeyinde bütünleşik olduklarını göstermektedir. Durağanlık

analizinden elde edilen bu bulgular, değişkenler arasında uzun dönemli bir ilişki olup olmadığını sınamak amacıyla eşbütünleşme testi uygulanmasını mümkün kılmaktadır.

Tablo 4. Birim kök test sonuçları

	CIPS	LLC	IPS
LnCO2	-1.720	-1.197	1.026
Δ LnCO2	-3.458*	-5.647*	-8.797*
DJT	-1.872	1.957	1.862
Δ DJT	-2.948**	-3.770*	-3.899*
LnGDP	-2.022	-1.170	-0.518
Δ LnGDP	-4.432*	-4.109*	-7.848*
LnENERJI	-1.09	0.153	-0.706
Δ LnENERJI	-3.622*	-6.247*	-9.161*
KENT	-1.908	-0.058	-0.154
Δ KENT	-4.885*	-3.850*	-7.296*

*Not. * ve ** sembolleri sırasıyla %1 ve %5 anlamlılık düzeyini belirtmektedir.*

Yatay kesit bağımlılığı, eğim heterojenliği ve birim kök testlerinden elde edilen bulgular, panelde ülkeler arasında ortak şokların bulunduğunu ve değişkenlerin birinci farkları alındığında durağan hale geldiklerini göstermektedir. Bu durum, seriler arasında uzun dönemli bir ilişkinin varlığının incelenmesini gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda Durbin-Hausman panel eşbütünleşme testi uygulanmıştır. Bu test, kesitler arası bağımlılığı ve heterojenliği göz önünde bulundurarak değişkenler arasındaki uzun dönemli denge ilişkisini sınamak açısından uygundur. Tablo 5'te sunulan sonuçlar, modeldeki değişkenler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir eşbütünleşme ilişkisinin bulunduğunu göstermekte ve bu ilişkinin uzun dönemli bir dengeyi yansıttığını doğrulamaktadır.

Tablo 5. Eşbütünleşme test sonuçları

Model	Testler	Test İstatistikleri	Olasılık Değerleri
$LnCO2_{it} = f(DJT_{it}, LnGDP_{it}, LnENERJI_{it}, KENT_{it})$	DH_g	-12.752*	0.000
	DH_p	-11.818*	0.000

*Not. * sembolü %1 anlamlılık düzeyini belirtmektedir.*

Eşbütünleşme ilişkisinin varlığının doğrulanmasının ardından, modelde yer alan değişkenler arasındaki uzun dönemli ilişkilerin yönü ve büyüklüğünü belirlemek amacıyla uzun dönem katsayı tahminlerine geçilmiştir. Bu doğrultuda, yatay kesit bağımlılığı ve eğim heterojenliği bulguları dikkate alınarak, ikinci nesil tahmin yöntemleri olan AMG ve CCEMG tahmincileri kullanılmıştır.

Tablo 6. Uzun dönem katsayı tahmin sonuçları

Değişkenler	AMG	CCEMG
DJT	0.001* (0.001)	0.001* (0.003)
LnGDP	0.014* (0.002)	0.221* (0.358)
LnENERJI	0.831* (0.107)	0.736* (0.127)
KENT	0.015 (0.014)	-0.127 (0.104)
Sabit terim	-26.148* (3.898)	1.014* (0.142)

*Not. *, %1 anlamlılık düzeyini belirtmektedir. Parantez içindeki değerler standart hataları göstermektedir.*

Tablo 6’da sunulan uzun dönem katsayı tahminleri, modelde yer alan değişkenlerin karbon emisyonları üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. AMG ve CCEMG tahmincilerinde dijitalleşme değişkeninin pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı bulunması, N11 ülkelerinde dijitalleşme düzeyindeki artışın uzun dönemde karbon emisyonlarını artırdığını göstermektedir. Bu durum, dijital dönüşümün bu ülke grubunda enerji talebini ve üretim hacmini genişleterek çevresel baskıyı artırdığına işaret etmektedir. Elde edilen sonuçlar, dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirliği desteklediğini belirten çalışmalarla (Chen vd., 2020; Wen vd., 2021; Saeed, 2021; Truong, 2022; Demirkıran vd., 2022; Ren vd., 2023; Teng vd., 2023; Yeşilyaprak ve Akıncı, 2025) tam olarak örtüşmemektedir. Bu çalışmalar, dijital teknolojilerin enerji verimliliği, kaynak yönetimi ve yeşil inovasyon kanalları aracılığıyla çevresel performansı geliştirebileceğini savunurken, bu çalışmada dijitalleşmenin özellikle artırılmış enerji kullanımı, dijital donanım üretimi ve atıkları ile altyapı kaynaklı emisyonlar üzerinden çevresel yük yarattığı sonucuna varılmıştır. Bu yönüyle bulgular, dijital dönüşümün çevresel sürdürülebilirlik üzerinde negatif dışsallıklar oluşturabileceğini vurgulayan Feroz vd. (2021) ile uyumludur. Ayrıca, Zulfiqar vd. (2023)’ün belirttiği gibi enerji tüketiminin dijitalleşme-çevre ilişkisinde aracılık rolü üstlenmesi, dijital teknolojilerin potansiyel çevresel kazanımlarını zayıflatmaktadır. N11 ülkelerinde dijital altyapının büyük ölçüde fosil enerjiye dayalı olması ve çevresel politika mekanizmalarının sınırlı kalması da bu pozitif etkinin temel

nedenleri arasında değerlendirilebilir. Adeshola vd. (2024)'ün vurguladığı üzere, dijitalleşmenin çevre üzerindeki iyileştirici etkisinin ortaya çıkabilmesi için belirli düzeyde çevre vergisi ve yeşil politika eşiklerinin sağlanması gerekmektedir.

Modelde ekonomik büyüme değişkeninin tüm tahmincilerde pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı bulunması, N11 ülkelerinde ekonomik büyümenin karbon emisyonlarını artırıcı bir unsur olarak işlediğini göstermektedir. Bu bulgu, Adeshola vd. (2024)'ün kişi başına gelir artışının çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki olumsuz etkisine ilişkin bulgularıyla uyumlu olup büyümenin çevresel maliyetini vurgulamaktadır. N11 ülkelerinde ekonomik genişleme süreci, üretim kapasitesinin ve enerji talebinin artışı yoluyla daha yüksek emisyon düzeylerine yol açmakta; bu da büyümenin çevresel etkilerinin hala fosil yakıt temelli üretim yapısından beslendiğini göstermektedir. Dolayısıyla, ekonomik büyüme süreci yeşil teknolojiler ve sürdürülebilir üretim modelleriyle desteklenmediği sürece çevresel baskıyı hafifletmek yerine derinleştiren bir mekanizma olarak çalışmaktadır. Enerji yoğunluğu değişkeninin pozitif ve yüksek düzeyde anlamlı bulunması, enerji kullanımındaki artışın doğrudan karbon salınımlarını artırdığını ve enerji yapısının emisyon dinamiklerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu bulgu, N11 ülkelerinde üretim yapısının halen enerji yoğun sektörlerle dayandığını ve dijitalleşme sürecinin getirdiği üretim genişlemesi ile bilgi ve iletişim altyapısında artan enerji talebi yoluyla çevresel baskı yarattığını göstermektedir. Dolayısıyla dijital dönüşüm süreci, enerji verimliliği politikalarıyla desteklenmediği takdirde enerji talebindeki artışı daha da hızlandırarak karbon yoğunluğunu artırma potansiyeline sahiptir. Bu durum, dijitalleşmenin sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayabilmesi için yeşil enerji dönüşümüyle eşgüdümlü bir şekilde ilerlemesi gerektiğini açık biçimde göstermektedir. Kentleşme oranı değişkeni, farklı tahmincilerde pozitif ve negatif yönlü katsayılara sahip olmakla birlikte istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Bu durum, N11 ülkelerindeki kentleşme düzeyinin karbon emisyonları üzerindeki etkisinin belirgin ve tutarlı bir biçimde ortaya çıkmadığını göstermektedir. Kentleşmenin çevresel etkileri, ülkelerin ekonomik gelişmişlik düzeyi, enerji altyapısı, dijitalleşme kapasitesi ve şehirleşme politikalarındaki farklılıklara bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir.

5. SONUÇ

Sürdürülebilir kalkınmanın temel sütunlarından biri olan çevresel sürdürülebilirlik, günümüzde gelişmekte olan ekonomiler için stratejik bir politika önceliği haline gelmiştir. Bu bağlamda dijitalleşme, ekonomik büyüme

ve enerji yapısındaki dönüşümler çevresel performansın belirlenmesinde giderek daha kritik bir rol oynamaktadır. Ancak dijitalleşmenin çevresel etkileri, ülkelerin ekonomik yapısı, enerji kompozisyonu ve kurumsal kapasitesine bağlı olarak farklı biçimlerde ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, N11 ülkelerinde dijitalleşme ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişki 1997-2023 dönemi kapsamında panel veri analiz prosedürü takip edilerek incelenmiştir. Analiz bulguları, N11 ülkelerinde dijitalleşme düzeyindeki artışın karbon emisyonlarını artırıcı yönde etkide bulunduğunu göstermiştir. Bu sonuç, dijital dönüşüm sürecinin söz konusu ülke grubunda halen enerji tüketimini artıran ve üretim hacmini genişleten bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Bulgular, dijitalleşmenin enerji verimliliği ve yeşil altyapı yatırımlarıyla desteklenmediği durumlarda çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunmak yerine çevresel bozulmayı hızlandırabileceğini göstermektedir. Bu yönüyle dijitalleşme, çevresel fayda sağlaması için doğru yönlendirilmesi gereken çift yönlü bir araç niteliğindedir.

Ekonomik büyüme değişkenine ilişkin sonuçlar, N11 ülkelerinde ekonomik genişlemenin enerji talebini ve üretim faaliyetlerini artırarak karbon salınımını artırdığını doğrulamaktadır. Bu bulgu, gelişmekte olan ekonomilerin halen çevresel Kuznets eğrisinin artan aşamasında konumlandığını, yani ekonomik büyümenin çevresel maliyetler pahasına gerçekleştiğini göstermektedir. Benzer biçimde, enerji yoğunluğu değişkenine ilişkin bulgular, enerji tüketimindeki artışın doğrudan emisyonları yükselttiğini ve enerji yapısının emisyon dinamiklerinde belirleyici bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuç, dijitalleşmenin çevresel etkilerinin enerji yapısına bağlı olduğunu ve fosil yakıt bağımlılığı sürdükçe dijital dönüşümün yeşil kalkınma hedefleriyle çelişebileceğini göstermektedir. Buna karşılık, kentleşme oranı değişkeninin istatistiksel olarak anlamlı bulunmaması, N11 ülkelerinde kentleşme düzeylerinin karbon emisyonları üzerindeki etkisinin belirgin ve tutarlı bir biçimde ortaya çıkmadığını göstermektedir. Kentleşmenin çevresel etkileri, ülkelerin ekonomik gelişmişlik düzeyi, enerji altyapısı, dijitalleşme düzeyi ve şehirleşme politikalarındaki farklılıklara bağlı olarak değişebilmektedir.

Çalışmadan elde edilen genel bulgular, N11 ülkelerinde dijitalleşmenin mevcut koşullar altında çevresel sürdürülebilirliğe doğrudan katkı sunmadığını, aksine enerji yoğun üretim yapısı nedeniyle emisyon artışını tetikleyen bir faktör haline geldiğini göstermektedir. Bir diğer ifadeyle, dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki doğrudan etkilerinin dolaylı etkilerine kıyasla daha baskın bir rol oynadığı anlaşılmaktadır. Dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik üzerinde tespit edilen negatif etkisiyle doğrulanan bu çıkarım, dijital dönüşümün sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu olabilmesi için yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması, enerji

verimliliği politikalarının güçlendirilmesi ve yeşil dijitalleşme stratejilerinin hayata geçirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Bu bakımdan N11 ülkelerinde çevresel sürdürülebilirliğin tesisi yalnızca dijital teknolojilerin yaygınlaştırılmasına değil, aynı zamanda bu teknolojilerin yeşil enerji, kaynak verimliliği ve düşük karbonlu üretim süreçleriyle entegrasyonuna bağlı olmaktadır. Aksi takdirde dijital dönüşüm ekonomik büyümeyi teşvik edici bir rol üstlense bile çevresel baskıyı artırarak sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle çelişen bir dinamik yapı ortaya çıkarabilmektedir. Bu nedenle, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasını amaçlayan politika uygulamalarının dijitalleşmeyi yeşil dönüşümün aracı haline getirecek bütüncül bir stratejik çerçevede dizayn edilmesinin, bu politika uygulamalarından etkin sonuçlar alınabilmesine katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

5. Kaynaklar

- Adeshola, I., Usman, O., Agoyi, M., Awosusi, A. A., & Adebayo, T. S. (2024). Digitalization and the environment: the role of information and communication technology and environmental taxes in European countries. *Natural Resources Forum*, 48(4), 1088-1108.
- Akandere, G. (2021). Dijitalleşme düzeyi ve yeşil lojistik uygulamaların lojistik performansa etkisi. *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi SBE Dergisi*, 11(4), 1979-2000.
- Bieser, J. C., & Hilty, L. M. (2018). *An approach to assess indirect environmental effects of digitalization based on a time-use perspective*. In Advances and New Trends in Environmental Informatics: Managing Disruption, Big Data and Open Science. Cham: Springer International Publishing.
- Bilbay, Ö. F. (2024). İklim krizi ve dijitalleşme. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 22(Özel Sayı: Endüstri 4.0 ve Dijitalleşmenin Sosyal Bilimlerde Yansımaları), 1544-68.
- Bond, S., & Eberhardt, M. (2013). Accounting for unobserved heterogeneity in panel time series models. *University of Oxford*, 1(11), 1-12.
- Breusch, T.S., & Pagan, A.R. (1980). The Lagrange multiplier test and its application to model specification in econometrics. *Review of Economic Studies*, 47, 239-253.
- Chen, X., Despeisse, M., & Johansson, B. (2020). Environmental sustainability of digitalization in manufacturing: A review. *Sustainability*, 12(24), 10298.
- Demirkıran, S., Beyoğlu, A., Terzioğlu, M. K., & Yaşar, A. (2022). Sürdürülebilir kalkınma odaklı dijitalleşme belirleyicilerinin verimlilik üzerindeki etkilerinin yapay sinir ağları ile sınıflandırılması. *Verimlilik Dergisi*, 30-47.
- Dünya Bankası-Dünya Kalkınma Göstergeleri (2025). <https://databank.world-bank.org/source/world-development-indicators>
- Eberhardt M, Bond S (2009). Cross-section dependence in nonstationary panel models: a novel estimator. *Munich Personal RePEc Archive*.
- Eberhardt M, Teal F (2010). Productivity analysis in global manufacturing production. *Discussion Paper 515*, Department of Economics, University of Oxford.
- Feroz, A. K., Zo, H., & Chiravuri, A. (2021). Digital transformation and environmental sustainability: a review and research agenda. *Sustainability*, 13(3), 1-20.
- Im, K. S., Pesaran, M. H., & Shin, Y. (2003). Testing for unit roots in heterogeneous panels. *Journal of Econometrics*, 115(1), 53-74.

- Leitoniene, S., & Kundeliene, K. (2021). *Sustainability reporting: the environmental impacts of digitalization*. In 2021 IEEE International Conference on Technology and Entrepreneurship (ICTE).
- Levin, A., Lin, C. F., & Chu, C. S. J. (2002). Unit root tests in panel data: asymptotic and finite-sample properties. *Journal of Econometrics*, 108(1), 1-24.
- Meydanoglu, E. B., & Hurmaci, O. (2023). Impacts of digitalization in industry on environmental sustainability. *PressAcademia Procedia (PAP)*, 17(10), 68-72.
- O'Connell, P. G. (1998). The overvaluation of purchasing power parity. *Journal of International Economics*, 44(1), 1-19.
- Ömür, G. A. (2025). Sürdürülebilirlik ve dijital dönüşüm kavramlarının etkililiğine yönelik bir değerlendirme. *Business & Management Studies: An International Journal*, 13(1), 127-147.
- Özen, Y. D. Ö., Soyuer, H., & Kazançoğlu, Y. (2025). Üretim Sistemlerinde Dijitalleşme ve Sürdürülebilirlik Üzerine Bir Araştırma. *Fenerbahçe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(1), 66-85.
- Özkaya, Y. (2025). Enerji tüketimi, çevresel sürdürülebilirlik ve dijitalleşme: gelişmekte olan ülkelerde ekonomik büyümeye etkileri. *Enderun*, 9(1), 67-87.
- Pesaran, M. H. (2006). Estimation and inference in large heterogeneous panels with a multifactor error structure. *Econometrica*, 74(4), 967-1012.
- 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.
- Pesaran, M. H., & Yamagata, T. (2008). Testing slope homogeneity in large panels. *Journal of Econometrics*, 142(1), 50-93.
- Ren, S., Hao, Y., & Wu, H. (2023). Digitalization and environment governance: does internet development reduce environmental pollution? *Journal of Environmental Planning and Management*, 66(7), 1533-62.
- Saracel, N., & Aksoy, I. (2021). Dijital sürdürülebilirlik, boyutları ve koşulları. *Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, 10(2), 347-356.
- Saeed, F. (2021). Environmental sustainability and digitization. *International Journal of Modern Agriculture and Environment*, 1(2), 83-98.
- Şimşek, Ş. E. (2024). Dijital teknolojilerin gücüyle sürdürülebilirlik: Döngüsel ekonomi kapsamında sıfır atık uygulama önerisi. *Journal of Business and Trade*, 5(1), 40-54.
- Teng, Z., He, Y., & Qiao, Z. (2023). Exploring the synergistic effects of digitalization and economic uncertainty on environmental sustainability: an investigation from China. *Sustainability*, 15(15), 11997.

- Truong, T. C. (2022). The impact of digital transformation on environmental sustainability. *Advances in Multimedia*, 2022(1), 6324325.
- Tuna, A. A., Cansu, E., & Tuna, M. (2024). Dijital Sürdürülebilirlik Ölçeğinin Türkçeye Uyarlama Çalışması. *Niğantaşı Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 12(Özel Sayı), 266-279.
- Wen, H., Lee, C. C., & Song, Z. (2021). Digitalization and environment: how does ICT affect enterprise environmental performance? *Environmental Science and Pollution Research*, 28(39), 54826-41.
- Westerlund, J. (2008). Panel cointegration tests of the Fisher effect. *Journal of Applied Econometrics*, 23(2), 193-233.
- Xu, J., She, S., & Liu, W. (2022). Role of digitalization in environment, social and governance, and sustainability: Review-based study for implications. *Frontiers in Psychology*, 13, 1-15.
- Yeşilyaprak, M., & Akıncı E. (2025). Dijitalleşmenin sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi: lojistik sektörü. *Beykoz Akademi Dergisi*, 13(1), 569-587.
- Zulfiqar, M., Tahir, S. H., Ullah, M. R., & Ghafoor, S. (2023). Digitalized world and carbon footprints: does digitalization really matter for sustainable environment? *Environmental Science and Pollution Research*, 30(38), 88789-802.