

-ARAŞTIRMA MAKALESİ-

ENDÜSTRİ 4.0 VE ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ARASINDAKİ İLİŞKİ: AVRUPA BİRLİĞİ ÜLKELERİ ÜZERİNE AMPİRİK BİR ANALİZ

Fatih AKIN¹ & Selin DİNÇER²

Öz

Endüstri 4.0 olarak bilinen dördüncü sanayi devrimi ve beraberinde getirdiği dijital dönüşüm tüm dünyada her geçen gün etkisini artırmaktadır. Bu eksende Endüstri 4.0 ile yaşanan dijital değişim bireylerin yaşamlarında ve çalışma hayatlarında köklü değişimleri beraberinde getirmektedir. Bireylerin yanı sıra çeşitli endüstrilerin üretim süreçlerinin iyileştirilmesinde de Endüstri 4.0 oldukça dikkat çekmektedir. Diğer taraftan 18. yüzyılda Sanayi Devrimi ile başlayan olumsuz çevresel etkilerin yanı sıra sürekli artan tüketim talebini karşılamak için kullanılan ve tükenmekte olan doğal kaynaklar ülkeleri harekete geçirmektedir. Avrupa Birliği ülkelerinde de Endüstri 4.0 ile ilişkili teknolojilerin benimsenmesini teşvik etmek amacıyla politikalar uygulandığı bilinmektedir. Bu anlamda Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir ekonomik büyüme, kalkınma ve çevreye katkı sağlayabileceği fikri gündeme gelmektedir. Bu çalışma Avrupa Birliği'ne üye 27 ülkede Endüstri 4.0 ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki kısa ve uzun dönemli ilişkiyi araştırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçtan yola çıkarak çalışmada, 1996-2020 dönemi için panel ARDL/PMG analiz yöntemi kullanılarak çevreyi temsilen ekolojik ayak izi, Endüstri 4.0'ı temsilen ise teknoloji patenti değişkenleri kullanılmıştır. Ayrıca ekonomik büyüme ve enerji tüketimi değişkenleri kontrol değişkeni olarak kullanılmıştır. Bulgular, Avrupa Birliği ülkelerinde uzun dönemde patent sayısındaki artışın ekolojik ayak izini azalttığını ortaya koymaktadır. Diğer taraftan çalışmada, Avrupa Birliği ülkelerinde ekonomik büyüme ve enerji tüketiminin ekolojik ayak izini artırdığı tespit edilmiştir. Çalışma bulguları, Avrupa Birliği ülkelerinde Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilir çevre üzerinde önemli etkisinin bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, Ekolojik Ayak İzi, Ekonomik Büyüme, Enerji Tüketimi, Avrupa Birliği.

JEL Kodları: O13, F64, O44.

Başvuru: 26.05.2024

Kabul: 27.09.2024

¹ Öğr. Gör. Dr., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Refahiye Meslek Yüksekokulu, fatih.akin@erzincan.edu.tr, Erzincan, Türkiye, ORCID No: 0000-0002-7741-4004

² Öğr. Gör. Dr., Kırıkkale Üniversitesi, Keskin Meslek Yüksekokulu, selindincer@kku.edu.tr, Kırıkkale, Türkiye, ORCID No: 0000-0003-3233-493X

THE RELATIONSHIP BETWEEN INDUSTRY 4.0 AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY: AN EMPIRICAL ANALYSIS ON EUROPEAN UNION COUNTRIES³

Abstract

The fourth industrial revolution, known as Industry 4.0, and the digital transformation it brings with it are increasing their impact worldwide every day. In this axis, the digital change experienced with Industry 4.0 brings radical changes in individuals' lives and working lives. In addition to individuals, Industry 4.0 draws attention in improving the production processes of various industries. On the other hand, in addition to the negative environmental impacts that started with the Industrial Revolution in the 18th century, the depleting natural resources used to meet the ever-increasing consumption demand mobilize countries. It is known that policies are implemented in European Union countries to encourage the adoption of technologies related to Industry 4.0. In this sense, the idea that Industry 4.0 can contribute to sustainable economic growth, development and the environment comes to the fore. This study aims to investigate the short and long term relationship between Industry 4.0 and environmental sustainability in 27 member countries of the European Union. Based on this purpose, the study uses the panel ARDL/PMG analysis method for the period 1996-2020, using ecological footprint as a proxy for the environment and technology patent variables as a proxy for Industry 4.0. In addition, economic growth and energy consumption variables are used as control variables. The findings, reveal that the increase in the number of patents in the European Union countries in the long run reduces the ecological footprint. On the other hand, the study found that economic growth and energy consumption increase the ecological footprint in the European Union countries. The findings of the study reveal that Industry 4.0 technologies have a significant impact on the sustainable environment in the European Union countries.

Keywords: *Industry 4.0, Ecological Footprint, Economic Growth, Energy Consumption, European Union.*

JEL Codes: *O13, F64, O44.*

“Bu çalışma Araştırma ve Yayın Etiğine uygun olarak hazırlanmıştır.”

³ The Extended English Summary is located the end of the Article.

1. GİRİŞ

Sürdürülebilirlik kavramı oldukça geniş kapsamlıdır ve bireyler, firmalar ve toplum olmak üzere pek çok aktörü içerisine almaktadır. Çevre ve doğal kaynakların sınırlı olması, bu kaynakların sürdürülebilir olması açısından korunması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Sürdürülebilirliğin tek taraflı olarak gerçekleşmesi ise mümkün değildir. Dünya nüfusunun artması ile kaynakların hızla tükenme tehlikesi, sürdürülebilirliği teşvik edecek Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanımının önemini artırmaktadır. Bu noktada iyi entegre edilmiş Endüstri 4.0 teknolojileri dünyanın karşı karşıya kaldığı çevresel sorunların çözümünde önemli bir araç olarak kullanılabilir (Oláh vd., 2020).

Ekolojik ayak izi kavramı kişi veya kişilerin küresel doğal kaynaklar üzerindeki taleplerinin ölçüsü olarak ifade edilebilir. Ekolojik ayak izi yüksek üretkenliğe sahip bölgelerde çevresel bozulmanın önemli bir işareti olmakla birlikte çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir. 1990'lı yıllarında William Rees ve Mathis Wackernagel tarafından ortaya atılan ve literatüre kazandırılan bir kavramdır (Rees ve Wackernagel, 1996). Dolayısıyla çalışmada literatürde çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahip olan ve çevreyi temsil eden ekolojik ayak izi değişkeni kullanılmıştır.

Endüstri 4.0, çevre, enerji ve ekonomik büyüme arasında önemli bağlantılar bulunmaktadır. Ülkelerin büyüme ve kalkınma hedefleri çerçevesinde dünyada enerjiye olan ihtiyaç devamlı artmaktadır. Enerji kullanımının her geçen gün artması ise çevre üzerinde olumsuz etkiler meydana getirmektedir. Çevre ve doğal kaynaklar kıtır ve dünya nüfusu her geçen gün artmaktadır. Dünya nüfusunun artması üretim ve tüketimin de hızla artmasına yol açarak doğal kaynakların gelecekte yok olması ihtimalini güçlendirmektedir. Sürdürülebilirliği teşvik edecek Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanımının çevre ve doğal kaynakların tükenme tehlikesine çözüm üretebilmek adına önemli bir araç olduğu fikri güçlenmektedir. Açıklanan bu bağlantılar çalışmanın konusu ve değişkenlerinin belirlenmesinde ilham kaynağı olmuştur.

Çalışmanın temel amacı, Avrupa Birliği'ne üye 27 ülkede Endüstri 4.0 ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki kısa ve uzun dönemli ilişkiyi panel ARDL/PMG analiz yöntemini kullanarak incelemektir. Bu noktada çalışmada ekolojik ayak izi, ekonomik büyüme, enerji tüketimi ve teknoloji patenti değişkenleri kullanılarak Avrupa Birliği ülkelerinde Endüstri 4.0 ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişki ampirik bir analiz ile ele alınmıştır. Bu çalışma gerek ele alınan ülkeler gerekse kullanılan değişkenler bakımından diğer çalışmalardan farklılık göstermektedir. Bu sebepten ötürü literatüre katkı sağlaması beklenmektedir. Çalışma üç bölüme ayrılmıştır. Birinci bölümde Endüstri 4.0 ve çevreye ilişkin teorik ve tarihsel arka plana değinilecektir. Ardından literatür özetine yer verilecektir. İkinci bölümde veriler ve yöntem incelenecektir. Son olarak üçüncü bölümde ise ampirik bulgular rapor edilecektir.

1.1. Tarihsel ve Teorik Çerçeve

Endüstri 4.0 olarak bilinen dördüncü sanayi devrimi ve bunun altında yatan dijital dönüşüm katlanarak ilerlemektedir. Dijital devrim, bireylerin yaşam ve çalışma biçimlerini temelden yeniden şekillendirmekte ve Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirlik için sunabileceği fırsatlar da artmaktadır (Ghobakhloo, 2020). Özellikle 21. yüzyılda dünya Endüstri 4.0 olarak adlandırılan dijital bir dönüşüme tanıklık etmektedir. 18. yüzyılda Sanayi Devrimi ile başlayan olumsuz çevresel etkilerin yanı sıra sürekli artan tüketim talebini karşılamak için kullanılan ve tükenmekte olan doğal kaynaklar ülkeleri harekete geçirmektedir. Bu anlamda Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir ekonomik, çevresel ve sosyal kalkınmaya katkı sağlayabileceği fikri dikkat çekmektedir.

Lin vd. (2017: 4) Endüstri 4.0'ı akıllı siber-fiziksel sistemlerle inşa edilen akıllı fabrikaların vizyonu olarak değerlendirmiştir. Oláh vd. (2020: 48) Endüstri 4.0'ı, bilgi ve iletişim teknolojisi (ICT) devrimi yoluyla gelişen entegre ve birbirine bağlı bir dünyanın parçası olarak tanımlamışlardır. 18. yüzyılda Sanayi Devrimi ile buhar makinesinin icadının ardından makineler insanların yerini alarak ana güç kaynağı haline gelmiştir. Dolayısıyla 1. Sanayi Devrimi ile su ve buhar gücüyle çalışan mekanik üretim tesisleri devreye girmiştir (Bunse vd., 2014). Ardından iş bölümüne dayalı elektrik gücünün yaygınlaşması üretim sürecinde yeniliklere yol açmıştır. Seri üretime geçiş ile ikinci sanayi devrimine doğru bir geçiş yaşanmıştır. Üçüncü sanayi devriminin başlamasında ise 1970'lerde yaşanan bilgi teknolojisi gelişiminin ardından üretim otomasyonunun gelişmesi ve dolaylı olarak internetin yükselişi etkili olmuştur. Diğer taraftan araştırmacılar ve bilim insanları tarafından siber-fiziksel sistemlere dayanan Nesnelerin İnternetinin (IoT) dördüncü sanayi devrimine yol açacağı konusu gündeme gelmiştir. Dördüncü sanayi devrimi kavramı, endüstriyel iyileştirmeler ve dönüşüm için dünya çapında ana fikir olarak hükümet politikalarına uyarlanmıştır (Bunse vd., 2014; Lin vd., 2017: 4).

Endüstri 4.0 ile ilgili öne çıkan temel özellikler şu şekilde ele alınabilir. Birincisi Endüstri 4.0 birlikte çalışan, birbirine bağlanan ve iletişim kuran makineler, cihazlar ve insanları konu alan geniş kapsamlı bir oluşumdur. İkincisi Endüstri 4.0 bilgiye erişim ve bilgi şeffaflığının sağlanması konusunda sensör verileri aracılığıyla fiziksel dünyanın sanal bir kopyasını oluşturmaktadır. Üçüncüsü Endüstri 4.0 teknik yardım, karar verme ve sorun çözme konusunda bireyleri destekleme ve bireylere yardımcı olma yeteneğine sahiptir (Marr, 2017). Dolayısıyla tüm bu özellikler birlikte ele alındığında akıllı fabrika, ekipman, altyapı ve diğer unsurlar arasındaki etkileşim Endüstri 4.0'ın önemi ortaya koymaktadır (Lin vd., 2017).

Dünya ekonomisinde oldukça hızlı değişimler yaşanmaktadır. Dünya ekonomisinin büyüebilmesi ve canlılığını koruyabilmesi açısından üretim ve tüketim hareketliliği devam etmek zorundadır. Üretim ve tüketim hareketliliği küresel ölçekte her geçen gün enerjiye olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu durum ise fosil yakıtların daha fazla tüketimi anlamına gelmektedir. Ekonominin küresel ölçekte büyümesi, evrenin sürdürülebilirliği konusunda endişe vermektedir. Sanayileşme ve endüstrileşme

çevresel tahribatı hızla artırmakta, çevresel sürdürülebilirlik açısından endişeleri beraberinde getirmektedir. Günümüz dünyasında hızla artan enerji talebi, ülkelerin enerjide dışa bağımlılığı alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarının artan önemini ortaya koymaktadır. Bu sebepten dolayı "düşük karbon ekonomisi" zamanın gerektirdiği şekilde ortaya çıkmakta ve yaygın olarak ilgi görmektedir. Düşük karbonlu ekonominin özü, temiz enerji kullanımını arttırmak, bölgesel temiz kalkınmayı teşvik etmek, ürünlerin düşük karbonlu gelişimini desteklemek ve küresel ekolojik dengeyi korumaktır (Jiang vd., 2022: 415). Endüstri 4.0 çağında üretim, bilgi ve iletişim sistemleriyle sıkı bir şekilde birbirine bağlanarak daha ölçeklenebilir, rekabetçi ve bilgili hale gelmektedir (Javaid vd., 2022: 203).

Endüstri 4.0 projesinin arka planında 2006 yılındaki Alman Yüksek Teknoloji stratejisi bulunmaktadır. Alman hükümeti 2012 yılında Endüstri 4.0'ı yüksek teknoloji stratejisinin 10 gelecek projesinden biri haline getirmiştir. Günümüzde Avrupa Birliği dijital altyapıların yenilikçiliğini, güvenliğini ve dayanıklılığını teşvik etmek için bir dizi olası eylemleri uygulamaya koymaktadır. Özellikle Avrupa ekonomisinin gelecekteki rekabet gücünün gelişmiş dijital ağ altyapılarına ve hizmetlerine bağlı olması fikri bu anlamda Avrupa Birliği'ni harekete geçirmektedir. Çünkü hızlı, güvenli ve yaygın bağlantının sağlanması ile teknolojik ilerleme Avrupa'yı dünya ölçeğinde öne çıkaracak önemli bir gelişmedir (European Commission, 2024a). Avrupa Komisyon Üyesi Oettinger 14 Nisan 2015 tarihinde Avrupa sanayisinin dijitalleştirilmesine yönelik benimsenmesi gereken temel eylem önerileri hakkında gerçekleştirdiği konuşmasında, Avrupa'nın geleceğinin dijital olduğunu vurgulamıştır. Aynı toplantıda üye devletler ve sektör temsilcileri dijitalleşme ekseninde Avrupa'da tüm sektörlerin dijital dönüşümüne yönelik eylemlere odaklanması gerekliliğini, dijital tek bir pazar ve geniş bant yatırımı konusunda çabaların artırılması gerekliliğini ve Avrupa Birliği'nin dijitalleşme konusunda eylem ihtiyacının gerekliliğini vurgulamışlardır (Lemke, 2015: 7).

Bu çerçevede son dönemde Avrupa Birliği'nin 2021-2027 çok yıllık finansal çerçevesinde Dijital Avrupa Programı (DIGITAL) geliştirilmiştir. Bu program, dijital teknolojiyi işletmelere, vatandaşlara ve kamu idarelerine ulaştırmaya odaklanan bir Avrupa Birliği finansman programıdır. Avrupa'nın dünyanın diğer bölgelerinden gelen sistemlere ve çözümlere bağımlı olmaması gerekliliğinden yola çıkarak Dijital Avrupa Programı, yapay zekâ, süper bilgisayar, siber güvenlik ve dijital inovasyon merkezleri dâhil olmak üzere beş temel alanda ekonomi ve toplum genelinde dijital teknolojilerin geniş bir şekilde kullanılmasını sağlamak amacıyla toplam 7.5 milyar avroluk bütçe ayırmıştır. Avrupa toplumu ve ekonomisinin dijital dönüşümünü şekillendirmeyi amaçlamaktadır (European Commission, 2024b).

Öte yandan Avrupa Birliği, sürdürülebilir kalkınmayı savunan kilit bir aktör olarak sürdürülebilir çevre politikalarında önemli bir gelişme kaydetmiştir (Häbel ve Hakala, 2021: 633). 2016 yılında Paris İklim Anlaşması iklim değişikliği konusunda hukuki açıdan bağlayıcı bir uluslararası anlaşmadır. Paris İklim Anlaşması ile benzer hedefleri olan Avrupa Yeşil Mutabakatı ise 2019 yılında açıklanmıştır. Bu anlaşmayla AB iki temel çevre politikası belirlemiştir. Öncelikle bu politikalardan

ilki, 2030 yılına kadar sera gazı emisyon azaltımını en az %55'e çıkarmaktır. İkincisi ise 2050 yılına kadar Avrupa'yı dünyanın ilk iklim nötr kıtasına dönüştürmeyi hedefleyen politikadır. Bu anlamda Avrupa Birliği'nin 2021-2027 dönemine ilişkin bütçesi, iklim nötrlüğüne geçişi desteklemek üzere tasarlanmıştır (European Council, 2024). Dolayısıyla günümüzün sürdürülebilir kalkınma paradigmasında yadsınamaz bir şekilde sürdürülebilir çevre politikalarını ön planda tutan yeşil ekonomik dönüşüm yer almaktadır. Hükümetlerin ise bu minvalde yeşil bütçe uygulamalarını benimsemesi gerekmektedir (Aydın vd., 2023: 2-3). Bu çerçevede Endüstri 4.0 çevre dostu ürünler geliştirmek için ürün ve kullanıcı ilişkilerinden önemli bilgiler elde ederek ülkelerin sürdürülebilir çevre politikalarına da hizmet edebilmektedir.

1.2. Literatür Özeti

Günümüzde birçok ülkede sürdürülebilir bir çevre platformu oluşturmak için Endüstri 4.0 teknolojileri kullanılmaya başlanmıştır. Pek çok işletme artık kendi enerjilerini, insanları, iklimi ve kârı göz önünde bulundurarak sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda uygulamaya çalışmaktadır (Ghobakhloo, 2020). Literatürde ülke endüstrileri tarafından üretimde etkinliğin artırılmasına yönelik kullanılan yapay zekâ, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri, siber-fiziksel sistemler ve endüstrilerin ortaya çıkışı gibi teknolojilerin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi araştırma konusu olmuştur. Bu anlamda Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilir ekonomik ve çevresel boyutlarının incelenmesi gerekmektedir.

Diğer taraftan ülkelerin büyüme ve kalkınma hedefleri çerçevesinde dünyada her geçen gün enerjiye olan ihtiyaç artmaktadır ve enerji tüketimindeki artış ile Endüstri 4.0, enerji tüketimi, ekonomik büyüme ve çevre arasındaki ilişki literatürde dikkatleri üzerine toplamıştır. Bu anlamda alan yazında yer alan bazı çalışmaların Endüstri 4.0, çevre, enerji ve ekonomik büyüme değişkenlerine odaklandığı görülmektedir.

Javaid vd. (2022) Endüstri 4.0, sürdürülebilirlik ve çevre konusunda literatür taramasına dayalı olarak gerçekleştirdikleri çalışmada, Endüstri 4.0 teknolojisinin malları daha iyi verimlilikle üretirken ve kaynak tüketimini azaltırken çevresel olarak sürdürülebilir olduğunu savunmaktadır. Çevre kirliliğini azaltmak ve verimliliği artırmak için kullanılan teknolojiler Endüstri 4.0'ın kullanımını daha işlevsel hale getirmektedir. Furstenau vd. (2020) bibliyometrik performans analizi yöntemini kullanarak 2010-2019 dönemlerinde Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi ele alan çalışmaları incelemiştir. Bulgular, Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirliği ilişkilendiren çalışmaların çoğunlukla ekonomik ve çevresel boyutlara odaklandığını, sosyal boyut ile ilişkilendirilmesinin ise zayıf olduğunu vurgulamaktadır.

Oláh vd. (2020) çalışmalarında 2000-2020 yılları arasında yayınlanan Endüstri 4.0 ve çevresel sürdürülebilirlik ile ilgili konuları tartışan makaleleri ele almışlardır.

Endüstri 4.0 ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin entegrasyonunun çevresel sürdürülebilirliği artırarak eskisinden daha olumlu bir etkiyle yüksek çevresel performansı garanti eden ekolojik destek oluşturduğunu ortaya koymuşlardır. Endüstri 4.0'ın çevresel performansı olumlu yönde etkileyeceğini savunan çeşitli çalışmalar bulunmakla birlikte (Oláh vd., 2020) Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir çevreden ziyade geliri ve rekabet gücünü artırabilmek için öncelikle üretim ve kaliteyi artırmaya odaklandığını savunan çalışmalar da bulunmaktadır (Lentner vd., 2019). Bu noktada Endüstri 4.0'ın karşı karşıya kaldığı zorluklar göz önüne alındığında dahi sürdürülebilir çevreden ziyade üretime odaklandığı düşüncesi öne çıkmaktadır. Ayrıca Endüstri 4.0'ın çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki doğrudan etkisini ise tahmin etmenin zor olduğu düşünülmektedir (Smith, 2011). Ejsmont vd. (2020) bibliyometrik analiz yöntemini kullanarak dijitalleşme, gerçek zamanlı veri, büyük veri gibi Endüstri 4.0 değişkenlerinin üretim, ürün yaşam döngüsü ve döngüsel ekonomi gibi sürdürülebilirliğe katkıda bulunabileceği alanlarla ilişkilendiren bir çerçeve önermektedir.

Ford ve Despeisse (2016) çalışmalarında üretimde ileri imalat teknolojilerinin benimsenmesinin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini ele almışlardır. Sonuç olarak üretimde ileri imalat teknolojilerinin kullanılmasının çevresel sürdürülebilirlik üzerinde faydalı olduğunu tespit etmişlerdir. Fakat henüz olgunlaşmamış bir teknoloji olarak, bu faydaların sürdürülebilirliğin her aşamasında gerçekleştirilmesinin önünde önemli zorlukların bulunduğu da özellikle dikkat çekmişlerdir. Lin vd. (2017) Çin ve Tayvan hükümetlerinin Endüstri 4.0'ı geliştirmek için uyguladıkları inovasyon politikalarını ele alarak karşılaştırmışlardır. Çin ve Tayvan hükümetleri için politika odağının Endüstri 4.0'ın ihtiyaç duyduğu altyapının geliştirilebilmesi için çevresel politikalar olduğu görülmüştür. Ayrıca yazarlar hükümetler tarafından Endüstri 4.0 kavramı altında ortaya çıkan teknolojilerin özellikle çevresel konulara odaklanması gerektiğinin altını çizmişlerdir.

Akin ve Ozgun (2024) 1995-2011 dönemi için Kırılgan Beşli ülkelerinde (Brezilya, Hindistan, Endonezya, Güney Afrika ve Türkiye) çevre kalitesi ve bilgi iletişim teknolojileri arasındaki ilişkiyi panel ARDL yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada çevre kalitesini temsilen ekolojik ayak izi, bilgi ve iletişim teknolojilerini temsilen internet kullanan bireylerin oranı değişkenleri kullanılmıştır. Bulgular, kısa ve uzun dönemde internet kullanımındaki artış, ekolojik ayak izini azalttığını ortaya koymaktadır.

Bildirici vd. (2023) çalışmalarında 1988-2022 döneminde Türkiye'de çevre kirliliği ve Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir çevre üzerindeki etkilerini Markov anahtarlamalı VAR (MS-VAR), Markov anahtarlamalı Granger nedensellik (MS-GC), Fourier VAR (FVAR) ve Granger nedensellik (FGC) yöntemlerini kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada ekonomik büyüme, çevre kirliliği, doğal gaz tüketimi, teknoloji patenti değişkenleri kullanılmıştır. MS-GC ve FGC nedensellik test sonuçlarına göre teknoloji patentinden çevre kirliliğine doğru tek yönlü bir nedensellik bulunduğu tespit edilmiştir.

Aydın vd. (2023) 1995-2018 döneminde 20 Avrupa Birliği ülkesinde ekolojik ayak izi, çevre koruma harcamaları, çevre vergileri, doğal kaynak kiralaları ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi panel eşbütünleşme yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Bulgular değişkenler arasında uzun dönemde anlamlı bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca İtalya ve Slovenya’da çevre koruma harcamalarındaki artışın çevre kirliliğini azalttığı, Avusturya, Polonya ve Slovakya’da doğal kaynak kiralalarındaki artışın ise çevre kirliliğini artırdığı tespit edilmiştir.

Petrol ve gaz endüstrisi de dâhil olmak üzere çeşitli endüstrilerin üretim süreçlerinin iyileştirilmesinde Endüstri 4.0 oldukça önemlidir. Endüstri 4.0, siber-fiziksel sistemler, internet tabanlı (IoT), büyük veri, bulut, otomasyon, siber güvenlik ve yapay zekâ dâhil olmak üzere modern teknolojiyi ifade etmektedir. Bazı sektörlerin dönüşümünde Endüstri 4.0’ın önemli bir etkisi olduğu düşünüldüğünde, sektörlerin enerjiye olan ihtiyaçlarının da aynı doğrultuda arttığı görülmektedir. Zira 2000’li yılların başlangıcında doğal gaz tüketiminin kademeli olarak arttığı dikkat çekmektedir (Bildirici vd., 2023: 2-3). 2000’li yıllardan sonra doğal gaz sanayi sektörünün enerji kaynağının önemli bir kısmını sağlamasının yanı sıra bireysel olarak da tüketimi artan bir gaz haline dönüşmüştür.

Galadima ve Aminu (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Nijerya’da doğal gaz ile ekonomik büyüme ilişkisi doğrusal olmayan birim kök ve doğrusal olmayan nedensellik testlerinden faydalanılarak incelenmiştir. Bulgular, doğal gaz tüketimindeki artışın ekonomik büyümeyi artırdığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde Abbasi vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da Pakistan’da enerji tüketiminin ekonomik büyümeyi olumlu etkilediği tespit edilmiştir. Shrouf vd. (2014) Endüstri 4.0 kavramından yola çıkarak İspanya’da IoT tabanlı akıllı üretim yönteminin enerji verimliliğini nasıl artırabileceğini incelemişlerdir. Sonuç olarak enerji verilerinin üretim yönetimi uygulamalarına entegre edilmesi yoluyla enerji verimliliğinin artırılabilirliğini ve israfın azaltılabileceğini tespit etmişlerdir.

Lu vd. (2019) Endüstri 4.0 dönemine uygun olarak, petrol ve gaz endüstrisinin teknolojilerini ve uygulama senaryolarını değerlendirmişlerdir. Yazarlar büyük veri ve endüstriyel nesnelerin interneti (IoT) olmak üzere petrol ve gaz 4.0 kavramının özünün, yüksek düzeyde dijitalleşmeye dayanan veri odaklı bir istihbarat sistemi olduğunu vurgulamışlardır. Diğer taraftan Raj vd. (2020) tarafından gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde imalat sektöründe Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanmasının önündeki engeller Gri Karar Verme Deneme ve Değerlendirme Laboratuvarı (DEMATEL) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde kaynak kıtlığının yanı sıra dijital strateji eksikliğinin Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanmasının önündeki en belirgin engel olduğu tespit edilmiştir.

Saidi ve Hammami (2015) Avrupa ve Kuzey Asya, Latin Amerika ve Karayipler ile Sahra Altı, Kuzey Afrika ve Orta Doğu olmak üzere dört bölgede 1990-2012 döneminde Genelleştirilmiş Momentler Yöntemi (GMM) kullanarak ekonomik büyüme ve CO₂ emisyonlarının enerji tüketimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

Bulgular, CO₂ emisyonlarının enerji tüketimi üzerinde önemli pozitif etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca çalışmada ekonomik büyümenin enerji tüketimi üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bayramoğlu ve Yurtkur (2016) 1960-2010 dönemi için Türkiye’de karbon emisyonu ve ekonomik büyüme arasındaki ilişki doğrusal ve doğrusal olmayan eşbütünleşme yöntemi kullanılarak ele almıştır. Bulgular, Türkiye’de ekonomik büyüme ile karbon emisyonu arasında uzun dönemli pozitif bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Myovella vd. (2019) 2006-2016 döneminde 33 Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) ve 41 Sahra Altı Afrika ülkelerinde dijitalleşmenin ekonomik büyümeye etkisini genelleştirilmiş doğrusal momentler yönteminden (GMM) faydalanarak incelemiştir. Çalışmada kişi başına düşen GSYİH, brüt sabit sermaye, kamu harcamaları, nüfus artışı, geniş bant abonelikleri, internet kullanımı, mobil aboneler ve ticaret açığı değişkenleri kullanılmıştır. Bulgular, ele alınan ülke gruplarında dijitalleşmenin iktisadi büyümeye katkı sağladığını ortaya koymuştur. Aydınbaş ve Erdinç (2023) ise 2000-2019 döneminde Almanya, ABD, Japonya, İngiltere ve Türkiye’nin de aralarında bulunduğu 18 ülkede Endüstri 4.0’ın ekonomik büyümeye etkisini panel veri analizi kullanılarak incelemiştir. Bulgular, uzun dönemde patent başvuruları ile orta ve ileri teknolojinin ihracattaki payında gerçekleşen artışın kişi başına geliri artırdığını ortaya koymuştur.

Pehlivan ve Efeoğlu (2019) çalışmalarında, 1990-2018 döneminde Türkiye’de teknoloji ve Endüstri 4.0’ın dış ticaret üzerindeki etkisi eşbütünleşme ve nedensellik analizi yardımıyla ele alınmıştır. Çalışmada patent başvuruları, ileri teknoloji ihracatı ve ticaret değişkenleri kullanılmıştır. Bulgular, değişkenler arasında uzun vadeli ve pozitif bir ilişki bulunduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda dış ticaretin ileri teknoloji ihracatı üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yavuz (2021) 2007-2019 döneminde 31 ülkede Endüstri 4.0 araçlarına ilgi düzeyinin ileri teknoloji ürün ihracatı ve ithalatına etkisini panel veri yönteminden faydalanarak ele almıştır. Elde edilen sonuçlara göre, yurt içi tasarruflar, ülkelerin ihracatını ve ithalatını pozitif yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Diğer taraftan patent sayısı ileri teknoloji ithalatını artırırken, ileri teknoloji ihracatını azaltmaktadır.

Aydın (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 1981-2015 döneminde Türkiye’de Endüstri 4.0 kapsamında teknolojik ilerleme ve istihdam arasındaki ilişki eşbütünleşme için gecikmesi dağıtılmış otoregresif (ARDL) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada teknolojiyi temsilen ar-ge harcamaları ve bilgi iletişim teknoloji ihracatı değişkenleri, istihdamı temsilen ise yükseköğretim mezunu istihdamı değişkeni kullanılmıştır. Ulaşılan bulgular, teknolojik ilerlemenin istihdamı vasıflı emek talebi yönünü değiştirdiğini ortaya koymaktadır.

Literatürden anlaşılacağı üzere sürdürülebilir çevre ve Endüstri 4.0 arasında önemli bağlantılar bulunmaktadır. Diğer taraftan literatürde enerji ve ekonomik büyüme, enerji ve Endüstri 4.0 konularına odaklanan makalelerin de bulunduğu

görülmektedir. Endüstri 4.0 ve sürdürülebilir çevreyi ele alan çalışmaların genellikle literatür taramasına dayanan çalışmalar olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ise sürdürülebilir çevre, Endüstri 4.0, ekonomik büyüme ve enerji tüketimi olmak üzere birbiri ile bağlantıları bulunan değişkenler ele alınarak ampirik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışma uygulanan ampirik analizin dışında ele alınan ülke grubu ve zaman aralığı bakımından da diğer çalışmalardan farklılık göstermektedir. Belirtilen tüm bu hususlar çalışmanın özgün yanını ortaya koymaktadır.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada 27 Avrupa Birliği ülkesinde 1996-2020 dönemi için Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir çevre üzerindeki kısa ve uzun dönem ilişkisi panel ARDL/PMG yöntemi ile incelenmiştir. Endüstri 4.0 için kullanılan değişken teknoloji patenti iken, çevre için kullanılan değişken ekolojik ayak izidir. Kontrol değişken olarak ise ekonomik büyüme ve enerji tüketimi modele dâhil edilmiştir. Değişkenlerin logaritmaları alınarak ve ekonometrik paket programlar kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bildirici vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmadan hareketle oluşturulan model Denklem 1'deki gibidir.

$$lnef_{it} = \beta_0 + \beta_{i1}lnpat_{it} + \beta_{i2}lngdp_{it} + \beta_{i3}lnec_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Tablo 1'de modele dâhil edilen değişkenlere ilişkin ayrıntılar yer almaktadır.

Tablo 1. Modelde Kullanılan Değişkenler

Değişkenler	Kısaltmalar	Veri Kaynağı
Ekolojik Ayak İzi	lnef	GFN
Teknoloji Patenti	lnpat	OECD
Ekonomik Büyüme	lngdp	WB
Enerji Tüketimi	lnec	WB

Modelde bağımlı değişken ekolojik ayak izi (kişi başına küresel hektar) Küresel Ayak İzi (GFN) web sitesinden elde edilmiştir. Bağımsız değişkenlerden teknoloji patenti sayısı OECD web sitesinden, ekonomik büyüme (kişi başına 2015 sabit fiyatlarla ABD doları) ve enerji tüketimi (kişi başına birincil enerji tüketimi kWh) ise Dünya Bankası web sitesinden elde edilmiştir. Veri kısıtı nedeniyle 1996-2020 dönemi ele alınmıştır.

2.1. Ekonometrik Yöntem

Ampirik çalışmanın ilk aşamasında seriler arasında yatay kesit bağımlılığının varlığı incelenmektedir. Birim kök testinde birinci veya ikinci nesil birim kök testlerinden hangisinin kullanılacağı yatay kesit bağımlılığının var olup olmamasına bağlıdır. Değişkenler ve modelin yatay kesit bağımlılığı (YKB) Pesaran (2004) tarafından geliştirilen CD testi test edilmiştir. Bu test $N > T$ olduğunda kullanılmaktadır. Bu testte temel hipotez H_0 : Yatay kesit bağımlılığın olmadığını, alternatif hipotez ise

H_1 : Yatay kesit bağımlılığın var olduğunu ifade etmektedir. CD testinin hesaplanması Denklem 2’de verilmiştir (Pesaran, 2004, 2021).

$$CD(Pesaran, 2004) = \sqrt{\left(\frac{2T}{N(N-1)}\right)} \left(\sum_{i=1}^{N-1} T \sum_{j=i+1}^N \hat{\rho}_{ij}^2\right)^{asy} \sim N(0,1) \quad (2)$$

İkinci aşamada, Pesaran ve Yamagata (2008) tarafından oluşturulan Delta Tilde ve Delta Tilde_{adj} testlerini kullanarak eğitim homojenliği incelenmiştir. Bu testlerde temel hipotez H_0 : Eğitim katsayılarının homojen olduğu, alternatif hipotez ise H_1 :Eğitim katsayılarının heterojen olduğunu ifade etmektedir. Bu testlerin hesaplanması Denklem 3 ve 4’te verilmiştir (Pesaran ve Yamagata, 2008).

$$Delta\ Tilde = \sqrt{N} \frac{N^{-1}\hat{s}-k}{\sqrt{2k}} \quad (3) \quad Delta\ Tilde_{adj} = \sqrt{N} \frac{N^{-1}\hat{s}-k}{var(t,k)} \quad (4)$$

Üçüncü aşamada birim kök testi, Pesaran (2007) tarafından geliştirilen ikinci nesil birim kök testlerinden biri olan CIPS testi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CIPS birik kök testi hem yatay kesit bağımlılık hem de eğitim katsayılarının heterojen olduğu durumda kullanılmaktadır. Bu testin temel hipotezi H_0 : Birim kökün var olduğunu, alternatif hipotez ise H_1 :Birim kökün var olmadığını ifade etmektedir. CIPS birik kök testinin hesaplanması Denklem 5’te verilmiştir (Pesaran, 2007).

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

Dördüncü aşamada ise değişkenlerin farklı seviyede durağan olmasından dolayı kısa ve uzun dönem ilişkisi, Pesaran vd. (1999) tarafından oluşturulan panel Otoregresif Dağıtılmış Gecikme (ARDL) yöntemi kullanılarak ele alınmıştır. Panel ARDL yönteminde iki tahminci kullanılmaktadır. Bunlar; Ortalama Grup (MG) ve Havuzlanmış Ortalama Grup (PMG) tahmin yöntemleridir. Uygun tahminciyi seçmek için Hausman testi kullanılmaktadır. Panel ARDL denklemi 1’ nolu modelin denkleminde hareketle oluşturularak 6’ nolu denklemde gösterilmiştir.

$$lnef_{it} = \alpha_i + \sum_{j=1}^p \beta_{ij} ln(e_{f})_{i,t-j} + \sum_{j=0}^q \delta_{ij} lnpat_{i,t-j} + \sum_{j=0}^k \theta_{ij} lngdp_{i,t-j} + \sum_{j=0}^l \gamma_{ij} lnec_{i,t-j} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

Panel ARDL modelinin hata düzeltme mekanizması ise 7’ nolu denklemde gösterilmiştir.

$$\Delta(lnef)_{it} = \alpha_i + \varphi_i ln(e_{f,t-1}) + \delta_i lnpat_{it} + \theta_i lngdp_{it} + \gamma_i lnec_{it} + \sum_{j=1}^{p-1} \beta_{ij}^* \Delta ln(e_{f})_{i,t-j} + \sum_{j=0}^q \delta_{ij}^* \Delta lnpat_{i,t-j} + \sum_{j=0}^k \theta_{ij}^* \Delta lngdp_{i,t-j} + \sum_{j=0}^l \gamma_{ij}^* \Delta lnec_{i,t-j} + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

3. BULGULAR

Bu bölümde 1996-2020 döneminde Avrupa Birliği ülkelerinde Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir çevre üzerindeki kısa ve uzun dönemli ilişkiyi incelemek amacıyla gerçekleştirilen panel ARDL/PMG analiz yöntemi ile ulaşılan bulgulara yer verilmiştir.

Ampirik analizin tanımlayıcı istatistiklerine ilişkin bilgiler Tablo 2'de yer almaktadır. Tablo 2 incelendiğinde, ortalaması en yüksek değişkenin enerji tüketimi (ec), ortalaması en düşük değişkenin ise ekolojik ayak izi (ef) olduğu görülmektedir. Standart sapması en yüksek değişken teknoloji patenti (pat), standart sapması en düşük değişken ise ekolojik ayak izi (ef) olmuştur. Diğer taraftan minimumda en yüksek değişkenin enerji tüketimi (ec), en düşük değişkenin ise teknoloji patenti (pat) olduğu görülmektedir. Maksimum değerler incelendiğinde, maksimumda en yüksek değişkenin enerji tüketimi (ec), en düşük değişkenin ise ekolojik ayak izi (ef) olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Tanımlayıcı İstatistikler

Değişkenler	Gözlem Sayısı	Ortalama	Std. Sp.	Min	Max
lnef	675	1.688	0.324	0.895	2.849
lnpat	675	5.242	2.358	-0.405	10.136
lngdp	675	9.996	0.720	8.172	11.629
lnec	675	10.575	0.401	9.666	11.636

Çalışmada değişkenler ve model için gerçekleştirilen Yatay Kesit Bağımlılık (YKB) test sonuçları Tablo 3'te yer almaktadır. Test sonuçlarına göre H_0 hipotezi %1 önem düzeyinde reddedilmektedir. Yani hem değişkenler hem de model YKB içermektedir.

Tablo 3. Yatay Kesit Bağımlılık Test Sonuçları

CD test	lnef	lnpat	lngdp	lnec	Model
Pesaran	29.311	64.510	75.852	30.131	8.506
CD	(0.000)*	(0.000)*	(0.000)*	(0.000)*	(0.000)*

Not: * simgesi, %1 anlamlılık düzeyini ifade eder.

Eğim katsayılarının homojen olup olmadığının sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Homojenlik testi sonuçlarına göre, H_0 hipotezi %1 önem düzeyinde reddedilmektedir. Yani, model heterojen bir yapıya sahiptir.

Tablo 4. Homojenlik Test Sonuçları

Test	Test İstatistiği	Olasılık Değeri
Delta Tilde	16.590	0.000*
Delta Tilde _{adj}	18.549	0.000*

Not: * simgesi, %1 anlamlılık düzeyini ifade eder.

Modelin YKB ve heterojenlik içermesinden dolayı çalışmada kullanılan ikinci nesil birim kök testlerinden CIPS sonuçları Tablo 5'te gösterilmiştir. Ulaşılan sonuçlara göre, $\ln ef$ (ekolojik ayak izi) ve $\ln ec$ (enerji tüketimi) $I(1)$ özelliği gösterirken, $\ln pat$ (patent sayısı) ve $\ln gdp$ (ekonomik büyüme) $I(0)$ özelliği göstermektedir. Yani $\ln ef$ ve $\ln ec$ birinci farkta durağanken, $\ln pat$ ve $\ln gdp$ seviyede durağandır.

Tablo 5. Birim Kök Test Sonuçları

Değişkenler	Düzyer Değerleri		1. Fark Değerleri
$\ln ef$	-1.182		-3.413*
$\ln pat$	-2.480*		-
$\ln gdp$	-2.385*		-
$\ln ec$	-1.820		-3.880*
Kritik Değerler	%1	%5	%10
	-2.30	-2.15	-2.07

Not: * simgesi, %1 anlamlılık düzeyini ifade eder.

Çalışmada değişkenlerin farklı seviyede durağan olduğu görülmektedir. Bu sebeple panel ARDL yöntemi ile kısa ve uzun dönem ilişkisi test edilmiştir. Hausman testine göre; olasılık değeri %5'ten büyük olduğu için PMG sonuçlarının dikkate alınması gerektiği Tablo 6'da verilmiştir. Panel ARDL/PMG kısa dönem sonuçlarına göre; patent sayısının artması Avrupa Birliği ülkelerinde ekolojik ayak izini azaltmasına rağmen istatistiki olarak anlamlı değildir. Ekonomik büyüme ve enerji tüketimi ise ekolojik ayak izini artırmaktadır. Uzun dönem sonuçlarına göre; patent sayısındaki artış Avrupa Birliği ülkelerinde ekolojik ayak izini azaltmaktadır. Ekonomik büyüme ve enerji tüketimi ise Avrupa Birliği ülkelerinde ekolojik ayak izini artırmaktadır. Hata düzeltme mekanizması (ECM_{t-1}) %1 önem düzeyinde modelin anlamlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 6. Panel ARDL/PMG Analiz Sonuçları

Değişkenler	Kısa Dönem		Uzun Dönem	
	Katsayı	Olasılık	Katsayı	Olasılık
Bağımlı Değişken: $\ln ef$				
$\ln pat$	-0.019	0.163	-0.082	0.000*
$\ln gdp$	0.889	0.000*	0.242	0.000*
$\ln ec$	0.462	0.000*	0.843	0.000*
Sabitli	-3.960	0.000*	ARDL Modeli (1, 1, 1, 1)	
ECM_{t-1}	-0.426	0.000*	Ülke Sayısı	27
Hausman Testi (χ^2)	1.69	(0.639)	Gözlem Sayısı	675

Not: *, %1 düzeyinde anlamlılığı ifade etmektedir.

4. TARTIŞMA

Çalışmada, Endüstri 4.0 ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki kısa ve uzun dönemli ilişkinin Avrupa Birliği'ne üye 27 ülke özelinde incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçtan yola çıkarak, 1996-2020 döneminin yıllık verileri kullanılarak panel ARDL/PMG yöntemi esas alınmıştır. Çalışmada ulaşılan ampirik bulgular, kısa dönemde Avrupa Birliği ülkelerinde patent sayısının artması ekolojik ayak izini azaltmasına rağmen istatistiki olarak anlamlı bir sonuca ulaşamadığını ortaya koymaktadır. Kısa dönemde ekonomik büyüme ve enerji tüketiminin artmasının ise ekolojik ayak izini artırdığı tespit edilmiştir. Uzun dönemde Avrupa Birliği ülkelerinde patent sayısındaki artışın ekolojik ayak izini azalttığı, ekonomik büyüme ve enerji tüketiminin artmasının ise ekolojik ayak izini artırdığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla çalışmadan elde edilen bulgular Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilir çevre üzerinde pozitif etkisinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmada ulaşılan bulguların Ford ve Despeisse (2016), Oláh vd. (2020), Ejsmont vd. (2020), Bildirici vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen bulgular ile uyumlu olduğu görülmektedir. Çalışma kapsamında ele alınan konu, gelecek nesillerin temiz ve güvenli bir çevre sürdürülebilir doğal kaynaklara erişimi açısından oldukça önemli olmasından dolayı konu ile ilgili daha fazla çalışma gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Endüstri 4.0'ın çevresel sürdürülebilirliğin yanı sıra ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi de araştırılması gereken önemli konular arasında yer almaktadır. Belirtilen bu çalışmaların farklı ülke grupları üzerine ampirik çalışmalarla ele alınmasının konunun çözümü açısından faydalı olacağı düşünülmektedir.

SONUÇ

Küresel ekonomide yaşanan hızlı değişim ve dönüşümler çevre tahribatını ciddi boyutlara taşımıştır. Diğer taraftan küresel ekonominin desteklenmesi ve büyümesi için enerjiye olan ihtiyaç giderek büyümektedir. Dünyada küresel olarak ekonomik ölçeğin büyümesi sürdürülebilirlik konusunda endişeler yaratmaktadır. Dünya ölçeği büyüdükçe fosil yakıtların tüketimi de artmaktadır. Başta karbon emisyonu olmak üzere sera gazlarında görülen artış çevre tahribatını hızlandırmaktadır. Endüstrinin ise çevre ve dünya ortamı üzerinde büyük etkisi bulunmaktadır. Bu noktada gelecekte tükenme tehlikesi bulunan çevre ve doğal kaynakların sürdürülebilir bir forma dönüştürülebilmesi oldukça önemlidir. Sürdürülebilirliği teşvik edecek Endüstri 4.0 teknolojilerinin kapsamlı bir şekilde entegre edilerek sürdürülebilirliği sağlayabilmek adına kullanılmasının sorunun çözümünde etkili bir araç olabileceği düşünülmektedir.

Bu kapsamda bu çalışmada Avrupa Birliği ülkelerinde 1996-2020 dönemi için Endüstri 4.0 ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki kısa ve uzun dönemli ilişki panel ARDL/PMG yöntemi ile analiz edilmiştir. Ampirik analizde öncelikle serilerin yatay kesit bağımlılığı ve homojenlik durumu analiz edilmiştir. Analiz sonuçları kurulan modelin heterojen yapıda olduğunu ve seriler arasında yatay kesit bağımlılığının bulunduğunu ortaya koymaktadır. Daha sonra CIPS birim kök testi

analizi gerçekleştirilmiştir. Birim kök testi sonuçları, ekolojik ayak izi ve enerji tüketiminin birinci farkta durağan olduğunu, patent sayısı ve ekonomik büyümenin ise seviyede durağan olduğunu ortaya koymaktadır. Değişkenlerin farklı seviyede durağan olmalarından dolayı sonraki süreçte değişkenler arasındaki kısa ve uzun dönemli ilişkiyi incelemek amacıyla Panel ARDL/PMG analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen test sonuçlarına göre, kısa dönemde Avrupa Birliği ülkelerinde patent sayısının artması ekolojik ayak izini azaltmasına rağmen istatistiki olarak anlamlı bir sonuca ulaşamamıştır. Kısa dönemde ekonomik büyüme ve enerji tüketiminin ise ekolojik ayak izini artırdığı tespit edilmiştir. Uzun dönem bulguları incelendiğinde, Avrupa Birliği ülkelerinde patent sayısındaki artışın ekolojik ayak izini azalttığı, ekonomik büyüme ve enerji tüketiminin ise ekolojik ayak izini artırdığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, Avrupa Birliği ülkelerinde sürdürülebilir çevrenin sağlanabilmesi için Endüstri 4.0'ın oldukça önemli olduğu görülmektedir. Öte yandan ekonomik büyüme ve enerji tüketiminin ekolojik ayak izini artırarak çevre üzerinde olumsuz bir etki meydana getirdiği çalışmadan elde edilen önemli bir bulgudur. Dünya ölçeğinde ekonomik, sosyal, politik vb. her alanda güçlenme arzusu ülkeler arasındaki rekabeti artırmaktadır. Bu durum ise kıt olan doğal kaynakların daha fazla kullanılmasını ve çevre tahribatını beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla günümüzde tüm ülkeler açısından sürdürülebilirlik kritik öneme sahiptir ve Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir ekonomik büyüme ve sürdürülebilir çevreye katkı sağlayabileceği görülmektedir. Bu anlamda Avrupa Birliği ülkeleri özelinde gerçekleştirilen bu çalışmanın diğer ülkeler için de gerçekleştirilmesi günümüzün önemli bir sorun alanı olan çevresel tahribatın çözümünde Endüstri 4.0 teknolojilerinin önemini ortaya koymak açısından kayda değer görünmektedir. Ülkelerin ve tüm paydaşların Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanımını teşvik etmesi son derece önemlidir. Ülkelerin Endüstri 4.0 teknolojilerinin çevre ve ekonomiye entegre edilmesine ilişkin daha fazla araştırma-geliştirme çalışmaları yapılması, eğitimler vererek paydaşların bilinçlendirmesi gerekmektedir.

THE RELATIONSHIP BETWEEN INDUSTRY 4.0 AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY: AN EMPIRICAL ANALYSIS ON EUROPEAN UNION COUNTRIES

1. INTRODUCTION

The concept of sustainability is quite wide-ranging and involves many actors, including individuals, firms, and society. The fact that the environment and natural resources are limited reveals the necessity of protecting these resources in terms of sustainability. The increasing world population and the danger of rapid depletion of resources increase the importance of using Industry 4.0 technologies that will promote sustainability.

There are important links between Industry 4.0, environment, energy, and economic growth. Within the framework of countries' growth and development targets, the need for energy in the world is constantly increasing. The increasing use of energy daily has negative impacts on the environment. Environment and natural resources are scarce and the world population is increasing day by day. The increase in the world population leads to a rapid increase in production and consumption, strengthening the possibility that natural resources will disappear in the future. The idea that the use of Industry 4.0 technologies to promote sustainability is an important tool to find solutions to the danger of depletion of the environment and natural resources is gaining strength. It is known that policies are implemented in European Union countries to encourage the adoption of Industry 4.0-related technologies.

The main objective of the study is to examine the short and long-run relationship between Industry 4.0 and environmental sustainability in 27 member countries of the European Union using the panel ARDL/PMG analysis method. At this point, the relationship between Industry 4.0 and environmental sustainability in the European Union countries is analyzed empirically by using ecological footprint, economic growth, energy consumption, and technology patent variables. This study differs from other studies in terms of both the countries considered and the variables used. For this reason, it is expected to contribute to the literature.

2. METHODS

In this study, the short and long-run relationship of Industry 4.0 on the sustainable environment for the period 1996-2020 in 27 European Union countries is analyzed by panel ARDL/PMG method. While the variable used for Industry 4.0 is technology patent, the variable used for the environment is ecological footprint. Economic growth and energy consumption are included in the model as explanatory variables.

In the first stage of the empirical study, the existence of cross-sectional dependence between the series was analyzed. In the second stage, slope homogeneity is analyzed using the Delta Tilde and Delta Tildeadj tests developed by Pesaran and Yamagata (2008). In the third stage, the unit root test is performed using the CIPS test, one of the second-generation unit root tests developed by Pesaran (2007). In the fourth stage, since the variables are stationary at different levels, the short and long-run relationship is analyzed using the panel Autoregressive Distributed Lag (ARDL) method developed by Pesaran et al. (1999).

3. RESULTS

According to the panel ARDL/PMG short-run results obtained from the study; although the increase in the number of patents in the European Union countries decreases the ecological footprint, it is not statistically significant. Economic growth and energy consumption increase the ecological footprint in the short run. According

to the long-run results; an increase in the number of patents decreases the ecological footprint in the European Union countries. Economic growth and energy consumption increase the ecological footprint in the European Union countries. The study results reveal that Industry 4.0 technologies significantly impact the sustainable environment in the European Union countries in the long run.

4. DISCUSSION

The study aims to examine the short- and long-term relationship between Industry 4.0 and environmental sustainability for 27 European Union member countries. Based on this purpose, the panel ARDL/PMG method is based on annual data for the period 1996-2020. The empirical findings of the study reveal that although the increase in the number of patents in the European Union countries in the short run reduces the ecological footprint, no statistically significant result can be reached. In the short run, economic growth and an increase in energy consumption were found to increase the ecological footprint. In the long run, it is determined that the increase in the number of patents in the European Union countries decreases the ecological footprint, while the increase in economic growth and energy consumption increases the ecological footprint. Therefore, the findings of the study reveal that Industry 4.0 technologies have a positive impact on the sustainable environment. It is seen that the findings of the study are in line with the findings of the studies conducted by Ford and Despeisse (2016), Oláh et al. (2020), Ejsmont et al. (2020), Bildirici et al. (2023). Since the issue addressed within the scope of the study is very important in terms of future generations' access to a clean and safe environment and sustainable natural resources, more studies should be carried out on the subject. The impact of Industry 4.0 on economic and social sustainability as well as environmental sustainability is among the important issues that need to be investigated. It is thought that addressing these studies with empirical studies on different country groups will be beneficial for the solution of the issue.

CONCLUSION

The findings of this study reveal that Industry 4.0 is very important for ensuring a sustainable environment in European Union countries. On the other hand, it is another important finding of the study that economic growth and energy consumption harm the environment by increasing the ecological footprint. The desire to become stronger in every field such as economic, social, political, etc. on a world scale increases the competition among countries. This situation brings along more use of scarce natural resources and environmental destruction. Therefore, sustainability is of critical importance for all countries today and it is seen that Industry 4.0 can contribute to sustainable economic growth and a sustainable environment. In this sense, the realization of this study, which was carried out specifically for the European Union countries, for other countries seems to be noteworthy in terms of revealing the importance of Industry 4.0 technologies in solving environmental destruction, which is an important problem area of today.

KAYNAKÇA

- Abbasi, K. R., Shahbaz, M., Jiao, Z. ve Tufail, M. (2021). How Energy Consumption, Industrial Growth, Urbanization, and CO₂ Emissions Affect Economic Growth in Pakistan? A Novel Dynamic ARDL Simulations Approach. *Energy*, 221, 119793.
- Akin, F. ve Ozgun, F. (2024). Impact of Internet Use on Ecological Footprint: Panel Data Analysis for Fragile Five Countries (Brazil, India, Indonesia, South Africa, and Türkiye). *Problemy Ekorożwoju*, 19(2), 139-152. <https://doi.org/10.35784/preko.5979>
- Aydın, E. (2018). Türkiye’de Teknolojik İlerleme ile İstihdam Yapısındaki Değişme Projesiyonu: Endüstri 4.0 Bağlamında Ampirik Analiz. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 16(31), 461-471.
- Aydınbaş, G. ve Erdinç, Z. (2023). Endüstri 4.0 Devriminin Ekonomik Büyümeye Etkileri Üzerine Panel Veri Analizi. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 41(3), 363-387.
- Aydın, M., Sogut, Y. ve Altundemir, M. E. (2023). Moving Toward the Sustainable Environment of European Union Countries: Investigating the Effect of Natural Resources and Green Budgeting on Environmental Quality. *Resources Policy*, 83, 1-10.
- Bayramoğlu, A. T. ve Yurtkur, K. Y. (2016). Türkiye’de Karbon Emisyonu ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Doğrusal Olmayan Eşbütünlüşme Analizi. *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 16(4), 31-46.
- Bildirici, M. E., Genç, S. Y. ve Boztuna, S. (2023). Sustainability, Natural Gas Consumption, and Environmental Pollution in the Period of Industry 4.0 in Turkey: MS-Granger Causality and Fourier Granger Causality Analysis. *Sustainability*, 15, 10742.
- Bunse B., Kagermann H. ve Wahlster, W. (2014). *Industrie 4.0 Smart Manufacturing for the Future*, Berlin: Germany Trade and Invest Gesellschaft fuer Aussenwirtschaft und Stanfortmarketing mbH.
- Ej-smont, K., Gladysz, B. ve Kluczek, A. (2020). Impact of Industry 4.0 on Sustainability—Bibliometric Literature Review. *Sustainability*, 12(14), 22-29.
- European Comission (2024a). Komisyon Yarının Dijital Altyapıları İçin Yeni Girişimler Sunuyor, Erişim: 17 Mayıs 2024, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_941
- European Comission (2024b). The Digital Europe Programme, Erişim: 17 Mayıs 2024, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/digital-programme>
- European Council (2024). Erişim: 18 Mayıs 2024, <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fitfor-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
- Ford, S. ve Despeisse, M. (2016). Additive Manufacturing and Sustainability: An Exploratory Study of the Advantages and Challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573-1587.

- Furstenau, L. B., Sott, M. K., Kipper, L. M., Machado, E. L., López-robles, J. R., Dohan, M. S., Cobo, M. J., Zahid, A., Abbasi, Q. H. ve Imran, M. A. (2020). Link Between Sustainability and Industry 4.0: Trends, Challenges and New Perspectives. *IEEE Access*, 8, 140079-140096.
- Galadima, M. D. ve Aminu, A. W. (2020). Nonlinear Unit Root and Nonlinear Causality in Natural Gas-Economic Growth Nexus: Evidence from Nigeria. *Energy*, 190, 116415.
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869.
- Global Footprint Network. (2024). Ecological Footprint (gha per person), Erişim: 10 Nisan 2024, <https://www.footprintnetwork.org/>
- Häbel, S. ve Hakala, E. (2021). Policy Coherence for Sustainable Development and Environmental Security: A Case Study of European Union Policies on Renewable Energ. *Environmental Policy and Governance WILEY*, 21, 633-646.
- Javaid, M., Haleem, A., Pratap Singh, R., Suman, R. ve Gonzalez, E. S. (2022). Understanding the Adoption of Industry 4.0 Technologies in Improving Environmental Sustainability. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 203-217.
- Jiang, L., Sakhare, S. R. ve Kaur, M. (2022). Impact of Industrial 4.0 on Environment Along with Correlation Between Economic Growth and Carbon Emissions. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 13(1), 415-423.
- Lemke, M. (2015). Horizon 2020 Info Day, DG CONNECT – *A3 European Commission*, Brussels.
- Lentner, C., Vasa, L., Kolozsi, P. P. ve Zéman, Z. (2019). New Dimensions of Internal Controls in Banking After the GFC. *Economic Annals XXI*, 176(3-4), 38-48.
- Lin, K. C., Shyu, J. Z. ve Ding, K. (2017). A Cross-Strait Comparison of Innovation Policy under Industry 4.0 and Sustainability Development Transition. *Sustainability*, 9, 786.
- Lu, H., Guo, L., Azimi, M. ve Huang, K. (2019). Oil and Gas 4.0 Era: A Systematic Review and Outlook. *Computers in Industry*, 111, 68-90.
- Marr, B. (2017). *Data Strategy, How to Profit from a World of Big Data, Analytics and the Internet of Things*, London: Kogan Page Ltd.
- Myovella, G., Karacuka, M. ve Haucap, J. (2019). Digitalization and Economic Growth: A Comparative Analysis of Sub-Saharan Africa and OECD Economies. *Telecommunications Policy*, 1-12.
- OECD. (2024). OECD(Stat) database, Erişim: 10 Nisan 2024, <https://www.oecd.org/>
- Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M. A., Haddad, H. ve Kitukutha, N. (2020). Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability. *Sustainability*, 12(11), 46-74.
- Pehlivan, C. ve Efeoğlu, R. (2019). Empirical Investigation of Technology-Industry 4.0 Relation of the Effect on Trade: An Analysis on Turkey. *Turkish Studies-Economics, Finance, Politics*, 14(4), 1487-1502.

- Pesaran, M. H., Shin, Y. ve Smith, R. P. (1999). Pooled Mean Group Estimation of Dynamic Heterogeneous Panels. *Journal of the American Statistical Association*, 94(446), 621-634.
- Pesaran, M. H. (2004). General Diagnostic Tests for Cross Section Dependence in Panels. *Cambridge Working Papers in Economics*, 435, 1-39.
- Pesaran, M. H. (2007). A Simple Panel Unit Root Test in the Presence of Cross-Section Dependence. *Journal of Applied Econometrics*, 22, 265-312.
- Pesaran, M. H. ve Yamagata, T. (2008). Testing Slope Homogeneity in Large Panels. *Journal of Econometrics*, 142(1), 50-93.
- Pesaran, M. H. (2021). General Diagnostic Tests for Cross-Sectional Dependence in Panels. *Empirical Economics*, 60(1), 13-50.
- Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., de Sousa Jabbour, A. B. L. ve Rajak, S. (2020). Barriers to the Adoption of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing Sector: An Inter-Country Comparative Perspective. *International Journal of Production Economics*, 224, 107546.
- Rees, W. ve Wackernagel, M. (1996). Urban Ecological Footprints: Why Cities Cannot be Sustainable—And Why They are a Key to Sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 16(4-6), 223-248
- Saidi, K. ve Hammami, S. (2015). The Impact of CO₂ Emissions and Economic Growth on Energy Consumption in 58 Countries. *Energy Reports*, 1, 62-70.
- Shrouf, F., Ordieres-Meré J. ve Miragliotta, G. (2014). Smart Factories in Industry 4.0: A Review of the Concept and of Energy Management Approached in Production Based on the Internet of Things Paradigm. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 697-701.
- Smith, J. A. (2011). Evaluating the Contribution of Interpretative Phenomenological Analysis: A Reply to the Commentaries and Further Development of Criteria. *Health Psychol*, 5, 55–61.
- World Bank. (2024). World Bank Open Data, Erişim: 10 Nisan 2024, <https://data.worldbank.org/indicator>
- Yavuz, O. (2021). Üretimde Kullanılan Endüstri 4.0 Araçlarına Olan İlgi Düzeyinin Yüksek Teknoloji Ürünleri İhracatı Üzerine Etkisi. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 13(1), 825-843.

ENDÜSTRİ 4.0 VE ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ARASINDAKİ İLİŞKİ:
AVRUPA BİRLİĞİ ÜLKELERİ ÜZERİNE AMPİRİK BİR ANALİZ

KATKI ORANI / CONTRIBUTION RATE	AÇIKLAMA / EXPLANATION	KATKIDA BULUNANLAR / CONTRIBUTORS
Fikir veya Kavram / <i>Idea or Notion</i>	Araştırma hipotezini veya fikrini oluşturmak / <i>Form the research hypothesis or idea</i>	Fatih AKIN Selin DİNÇER
Tasarım / <i>Design</i>	Yöntemi, ölçeği ve deseni tasarlamak / <i>Designing method, scale and pattern</i>	Fatih AKIN Selin DİNÇER
Veri Toplama ve İşleme / <i>Data Collecting and Processing</i>	Verileri toplamak, düzenlemek ve raporlamak / <i>Collecting, organizing and reporting data</i>	Fatih AKIN Selin DİNÇER
Tartışma ve Yorum / <i>Discussion and Interpretation</i>	Bulguların değerlendirilmesinde ve sonuçlandırılmasında sorumluluk almak / <i>Taking responsibility in evaluating and finalizing the findings</i>	Fatih AKIN Selin DİNÇER
Literatür Taraması / <i>Literature Review</i>	Çalışma için gerekli literatürü taramak / <i>Review the literature required for the study</i>	Fatih AKIN Selin DİNÇER