



Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Sürdürülebilir Ekonomi Üzerine Etkisi: Seçili OECD Ülkeleri Üzerine Bir Analiz*

Impact of Industry 4.0 Technologies on Sustainable Economy: An Analysis on Selected OECD Countries

ÖZET

İkinci dünya savaşı sonrasında sağlık ve teknoloji alanında yaşanan gelişmelerin etkisi ile nüfusun hızla artması ve ekonomilerin büyümesi üretim, dağıtım ve tüketim süreçlerinde enerjiye olan ihtiyacı artırmıştır. Artan enerji ihtiyacının genel olarak fosil yakıtlardan karşılanıyor olması, ekosistemde telafisi zor tahribatlara neden olmuştur. Bu nedenle çevresel tahribata ve ekolojik dengenin bozulmasına neden olan klasik üretim yöntemlerinden daha temiz ve yenilenebilir üretim yöntemlerine yönelmek ekosistemin geleceği için bir zorunluluk haline gelmiştir. Geliştirilen çevre teknolojileri ile enerjinin temini, depolanması ve kullanımı aşamasında Endüstri 4.0'ın avantajlarından yararlanabilmek için AR-GE yatırımlarının payının artırılması gerekmektedir. Bu noktada, fosil ve diğer enerji türlerine nazaran ulaşımı ve depolanması kolay olan “yeşil enerji” kavramı dikkatleri çekmektedir. Bu çalışmada, endüstri 4.0 teknolojilerinin, iklim değişikliğini hafifletici enerjileri içeren üretim biçimleri ve yeşil büyüme göstergelerinin ekonomik büyüme üzerine etkilerinin incelenmesi amacıyla, seçili OECD ülkeleri üzerine bir ekonometrik analiz yapılmıştır. Analizde, seçili yeşil büyüme ve çevre teknolojileri patent göstergelerinin GSYH üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, Sürdürülebilirlik, Yeşil Enerji, Ekonomik Büyüme

ABSTRACT

After the Second World War, the rapid increase in the population and the growth of the economies with the effect of the developments in the field of health and technology increased the need for energy in the production, distribution, and consumption processes. The fact that the increasing energy need is generally met from fossil fuels has caused damage on the ecosystem that is difficult to rectify. For this reason, it has become a necessity for the future of the ecosystem to turn to cleaner and renewable production methods rather than the classical production methods that cause environmental destruction and deterioration of the ecological balance. In order to benefit from the advantages of Industry 4.0 at the stage of energy supply, storage and use with the developed environmental technologies, it is necessary to increase the share of RD&D investments. At this point, the concept of “green energy”, which is easy to transport, and store compared to fossil and other types of energy, draws attention. In this study, an econometric analysis was conducted on selected OECD countries in order to examine the effects of industry 4.0 technologies, production forms containing climate change mitigating energies and green growth indicators on economic growth. In the analysis, the effects of selected green growth and environmental technologies patent indicators on GDP were examined.

Keywords: Industry 4.0, Sustainability, Green Energy, Economic Growth

GİRİŞ

Endüstri devrimleri, üretim metotlarında enerji sektöründeki geçişlere dayanan bir değişim yaratmıştır. Birinci Sanayi Devrimi buhar enerjisine geçişi simgelerken, İkinci Sanayi Devriminin simgesi ise elektrik enerjisine geçiş olmuştur. İçinde bulunduğumuz Endüstri 4.0 olarak adlandırılan Dördüncü Sanayi Devriminde enerji sektörü yeni bir yola yönelmiştir. Söz konusu enerji yönelimi, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına, temiz enerji de denilen yeşil enerji teknolojilerine, yeni teknolojilerle geliştirilen depolama imkanlarına, üretim alanlarından hareketle, lojistik, ürün kullanımı ve geri dönüşüme kadar uzanan uzun süreçte yeni bir enerji sisteminin oluştuğu görülmektedir.

İnsanın doğa ile mücadelesinin olumsuz sonuçları özellikle 18. yüzyıldan itibaren üretim ve tüketim bağlamında 20. yüzyılda göz ardı edilemeyecek biçimde ortaya çıkmıştır. Görülmektedir ki endüstrinin gelişmesi yeni imkanlar ve gelişmeler yaratmakla beraber, üretim sürecinde fosil yakıtların yoğun olarak kullanılması doğanın dengesinin bozulmasına sebep olmuştur. Hava, toprak ve su kirliliği başta olmak üzere ozon tabakasının delinmesi, asit yağmurları, küresel ısınma dünyanın karşı karşıya kaldığı en büyük sorunlardan birisi olarak dünya gündeminde yerini almıştır. Çözülmesi oldukça güç bu soruna çare aramak için ulusal ve uluslararası arenada dünya çapında kurum ve kuruluşlar oluşturulmuştur. Çevre sorunun çözülmesi için gösterilen gayretler ve sunulan çözüm önerileri konuyu esasen sürdürülebilir ekonomi ve genel itibarıyla sürdürülebilir hayat alanlarına taşımaktadır. Bu sebeple sürdürülebilir bir ekonomi için, ekonominin temellerinden birisi olan üretim sistemlerinin değişimi zorunluluk haline

* Bu çalışma, IERFM2023 Kongresinde sunulan bildirinin gözden geçirilmiş ve düzenlenmiş halidir.

¹ Öğr. Gör. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Yerköy Adalet Meslek Yüksekokulu, Hukuk Bölümü, Yozgat, Türkiye

² Doç. Dr., Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü, Sivas, Türkiye

Fatma Çelik Bayram¹ 
Hacı Ahmet Karadaş² 

How to Cite This Article

Bayram, F. Ç. & Karadaş, H. A. (2023). “Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Sürdürülebilir Ekonomi Üzerine Etkisi: Seçili OECD Ülkeleri Üzerine Bir Analiz”, Journal of Social, Humanities and Administrative Sciences, 9(67):3343-3352. DOI: <http://dx.doi.org/10.29228/JOSH.AS.71781>

Arrival: 15 July 2023

Published: 31 August 2023

International Journal of Social, Humanities and Administrative Sciences is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

This journal is an open access, peer-reviewed international journal.

gelmiştir. Yeşil ekonomi, yeşil üretim, yeşil istihdam, çevreye zarar vermeyen üretim başlıklarında birçok kavram ulusal ve küresel ekonomilerin gündeminde yer almaya başlamıştır. Dolayısıyla, sürdürülebilir ekonomi için doğa üzerinde negatif dışsallık yaratmayan üretim modellerinin oluşturulması çabası yoğunlaşmıştır.

Ülkeler, bu amacı gerçekleştirebilmek ve sürdürülebilir kalkınmaya ulaşabilmek amacıyla, genel olarak iklim değişikliği endişesi ile güneş ve rüzgar enerjisi gibi temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönelmişlerdir. Çevreye dost enerji teknolojilerine yapılan yatırım olanakları 2011 yılında Almanya’da Hannover Fuarı’nda ilk defa dile getirilen, nesnelere ve hizmetlerin internetinin üretim sürecine katılması şeklinde ortaya çıkan sınırsız bir hayal gücüne dayanan Endüstri 4.0 olarak isimlendirilen (Kagermann vd., 2013) Dördüncü Sanayi devrimi ile artış göstermiştir. Fiziki ve sanal dünyanın birleştiği, yüksek seviyede otomasyonla çalışılarak verimliliğin ve etkinliğin artırılmasının amaçlandığı (Alcácer ve Cruz-Machado, 2019), akıllı ürün ve üretim sürecinin yaratılmasını temel alan (Brettel vd., 2014) Endüstri 4.0, kendi bileşenlerinin kapsamında üretken ve modüler üretim sistemleri ile üretilen ürünün kendi üretim sürecini gözlemleyip kontrol edebildiği bir model olarak açıklanmaktadır (Lasi vd., 2014).

Birinci Endüstri Devriminden bu yana endüstrileşme birçok olumlu ve olumsuz sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Günümüzde yaşanan doğa kirliliği, tükenmeye yüz tutmuş enerji kaynakları nedeniyle üretim artık daha maliyetli ve sürdürülemez hale gelmiştir. Çünkü üretim aşamaları mal ve hizmet gibi pozitif çıktılar ile beraber doğa üzerinde negatif etkiler yaratmıştır. Ekonomik açıdan bakıldığında, kaynak ve enerji kısıtlılığı ve kaynakların israfının önüne geçilmesi için üretim sürecinin optimum bir şekilde yönetilmesi önem arz etmektedir. Bu sebeple, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik için üretimin doğa üzerinden negatif etkilerinin azaltacak çözümlerin önemi artmaktadır (Garetti ve Taisch, 2012). Söz konusu çözümler arasında bulunan Endüstri 4.0, bu konuda umut verici teknolojileri içermektedir. Çünkü Endüstri 4.0 teknolojileri enerji sektöründeki gelişmeleri şekillendirerek, doğru ve yerinde yatırımlarla yapay zeka, üretim süreçlerinin akıllı süreçlere çevrilmesiyle, verimliliğin artması, enerji ve toplam maliyetlerin düşmesi ile fosil yakıtlara olan bağımlılığının tersine dönmesi beklenmektedir (Schwab, 2017)

Çevresel Endüstri 4.0 teknolojileri ve sürdürülebilir ekonomi kavramları beraber ele alınarak seçilmiş OECD ülkeleri kapsamında Endüstri 4.0 teknolojileri ile çevreye dost üretim ve bu konudaki inovasyon çalışmalarının ekonomik büyüme üzerindeki etkilerinin incelendiği bu çalışma, dört bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde, Endüstri 4.0, sürdürülebilir ekonomi ve çevre arasındaki ilişkiler teorik olarak incelenmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde, endüstri 4.0 teknolojilerinin, iklim değişikliğini hafifletici enerjileri içeren üretim biçimleri ve yeşil büyüme göstergelerinin ekonomik büyüme üzerine etkileri ekonometrik analiz yardımıyla incelenmiştir. Çalışmanın sonucu dördüncü bölümde yer almaktadır.

ENDÜSTRİ 4.0 VE SÜRDÜRÜLEBİLİR EKONOMİDEKİ YERİ

Endüstri 4.0

Endüstri 4.0 kavramı, 2011 yılında literatüre dahil olduğundan itibaren ekonomik ve sosyal alanda derin bir değişim ve dönüşümün simgelerinden birisi olarak bilim alanının gündeminde yerini muhafaza etmektedir. Almanya’nın üretim süreçlerinin dijitalleşmesinin teşviğiyle ileri teknolojik stratejileri ile başlatılmış bir proje tarafından temellenmiştir (Sung, 2017). Endüstri 4.0 şirketler, fabrikalar, kaynaklar, tedarikçiler, lojistik ve müşteriler arasında sorunsuz bir iletişim ağı olarak nitelendirilmektedir (Carvalho vd., 2018). Söz konusu ağ üzerinden, üretimin değer zincirleri ve iş şekillerini temelden değiştirmeye yatkın bir teknoloji çağını olanaklı kılan üretim teknolojileri ile akıllı üretim modellerinin birleştirilmesi sağlanmaktadır (MacDougall, 2014). Bu sebeple Endüstri 4.0’ın önceki devrimlerden üç ana özellik farklı kılmaktadır. İlk farklılık, daha önce görülmemiş ve üstün yetenekli teknolojilerin üretilme özelliği ile yüksek seviyede “hız” sağlamasıdır. İkinci farklılık, “genişlik ve derinlik”, dijital teknolojilere dayanması ile ekonomik ve toplumsal olarak kişiler üzerinde çok boyutlu etkiler yaratan bir model ile ilerleyerek, teknolojik değişim ve sistemler geliştirmesidir. Üçüncü farklılık, “sistem etkisi” denilen her şeyin birbiri ile bağlantılı olduğu, bütünleşmiş bir dönüşümü içeren ağ sistemlerine imkan tanımasıdır (Fırat ve Fırat, 2017). Bu özellikleri ile Endüstri 4.0 yeni teknolojiler ve geniş temelli inovasyonlar ile diğer sanayi devrimlerine göre daha hızlı yayılabilen ve daha da derin dönüşümler gerçekleştiren bir süreçtir (Schwab, 2017).

Endüstri 4.0 teknolojileri ile makinelerin, veri toplamasına ve işlemesine, verileri analiz edip öneride bulunmasına, sorunu tespit edip çözüm sunmasına imkan sağladığı varlık şeklini aldıkları görülmektedir (Sung, 2017). Makinelerin bu nitelikleri ile, maliyetin düşürülmesi, daha kaliteli ürünlerin üretilmesi için hızlı, esnek ve üretken bir üretim süreci oluşturulması mümkündür. Böylesi bir üretim süreci, üretimde verimliliği artıran, ekonominin yapısını değiştiren, endüstriyel büyümeye öncüllük eden, şirket, ülke ve bölgelerin rekabet gücünü ve işgücü yapısını değiştiren bir nitelik taşımaktadır (Rüßmann vd., 2015).

Endüstri 4.0 modelinin temel bileşenlerini siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, hizmetlerin interneti, akıllı fabrika, ürün ve robotlar, eklemeli ürün (3D yazıcılar) ve artırılmış gerçeklik oluşturmaktadır. Bu bileşimler bütünüyle internet ile donatılmış dijital ürünlerin sistemini kapsamaktadır. Dijital ürün sistemlerinin büyük bir kısmı bulut teknoloji sayesinde saklanıp yönetilmektedir (Yılmaz, 2019).

Endüstri 4.0 sistemleri, karmaşık tedarik zinciri, ürün çeşitliliği talebini karşılayabilmek için, üretim sistemlerinin yüksek düzeyde esnek olmasını zorunlu kılmaktadır. Ürünün üretim sürecinden son müşteriye ulaşana kadar, üretim planlama, satış, müşteri ilişkileri departmanları ve tedarikçilerle entegrasyon, bilgi teknolojileri açısından sağlanmaktadır. Bu şekilde bir bilgi entegrasyonu yoluyla, özelleştirilmiş hizmet ürünlerin pazara hızlı ve etkin şekilde arz edilmesi mümkündür (Fallera ve Feldmüllera, 2015). Bilgi entegrasyonu ile ürünlerin eş zamanlı olarak planlanması üretim, pazara giriş ve teslimat sürelerinin kısalmasına, ürünün daha kaliteli ve mikro özelleştirmesine ve maliyetlerin düşürülmesine neden olan bir esneklik yaratılmaktadır (Cengiz, 2018). Diğer taraftan çözülmeye çalışılan en önemli problem, sahip olunan kıt kaynaklarla sayısı artmaya devam eden nüfusun arzu ve ihtiyaçlarının karşılanması problemidir. Endüstriyel gelişimini tamamlamış veya buna yaklaşan ülkelerin, verimlilikleri, ekonomik büyümeleri, kaliteli mal ve hizmet arzları ile toplumsal refahının artması ile bir takım olumsuz sonuçlar da ortaya çıkmıştır. Toplumun geleceğini riske atan yüksek üretim ve tüketim kaynakların hızlı tüketilmesi, küresel ısınma, iklim değişikliği ve çevrenin kirlenmesi gibi çok boyutlu pek çok sorunun ortaya çıkmasına neden olmuştur. Tüm bu sorunlar “sürdürülebilirlik” kavramını gündeme getirmiş ve çözüm konusunda dünyanın odak olarak üzerinde durduğu bir model haline gelmiştir (Morrar vd., 2017).

Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik, 20. yüzyılın ikinci yarısında ortaya çıkan bir kavram olmakla beraber literatürde çok sayıda tanımları yer almaktadır. Fakat, 1987 yılında Birleşmiş Milletler yayını olan “Ortak Geleceğimiz” raporunda “sürdürülebilir kalkınma” şeklinde yer bulan tanım en çok kabul görendir. Raporda sürdürülebilir kalkınma, gelecek nesillerin ihtiyaçlarının karşılanması potansiyelinden ödün verilmeden, günümüzde ihtiyaçların karşılanmasıdır, şeklinde tanımlanmıştır (UN, 1987). Sürdürülebilirlik ayrıca, bütün yaşam türlerinin gelişiminin sonsuza kadar süreceği ihtimali (Ehrenfeld, 2005), birey ve kurumların ortak bir bakış açısına ulaşmalarını mümkün kılan bir gelecek vizyonu (White, 2013), çevre ve sosyal şartların insanoğlunun güvenliğine, refahına ve sağlığına maksimum destek verebilmesi için, insan türünün yaşam biçimini dönüştürmesi (McMichael vd., 2003), biçimlerinde de tanımlanmıştır. Diğer bir tanımda sürdürülebilirlik, insan hayatı, insanın yaptığı faaliyetler ile eko sistemin beraberce desteklenebilmesi için, bireylerin ve toplumların ihtiyaçlarının doğa tarafından karşılanabilme potansiyeli arasında esasen bir dengenin oluşması sorunu olarak tanımlanmıştır (Choi ve Ng, 2011)

Sürdürülebilirlik, üç boyutlu bir kavramdır. Mal ve hizmet üretiminin devamlığını esas alarak üretimde sektörel dengesizlikten sakınarak, iç ve dış borçların da yönetilebilir düzeyde gerçekleştirilmesini amaç edinen sistem sürdürülebilirliğin ekonomik boyutunu göstermektedir. Sosyal boyutu ise, temel sosyal hizmetlerin (sağlık, eğitim, vb.), yeterli ve eşit dağılımı ile cinsiyet eşitliğini de kapsayan, bireysel katılımın sağlandığı, politik sorumluluğun olduğu sistemi ifade etmektedir. Çevresel boyutu, kaynakların dengesini bozmadan, üretimde biyolojik çeşitliliğe, atmosferin dengesine ve ekolojinin bütün faktörlerinin korunmasını içeren sistemdir (Tıraş, 2012). Ekonomik, çevresel ve sosyal boyutların gerekleri yerine getirildiğinde; doğal sermayenin korunarak, yenilenebilir doğal kaynakların ve yenilenemez doğal kaynakların kullanımında kirlilik ve atıkların dönüşümüne odaklanıldığında sürdürülebilir bir sistemin varlığından söz edilebilir (Sheth vd., 2011; Goodland, 1995). Sürdürülebilirlik kavramının söz konusu çok boyutluluğu birbirine bağlı ve birbirini tamamlayan bir bütün olarak düşünüldüğünde, bir boyutta meydana gelecek dengesizliğin, diğer iki boyutu olumsuz etkileyebileceği düşünülebilir. Çünkü toplumların ihtiyaçlarının karşılanarak refah seviyelerinin yükseltilebilmesi için üretimin sürekliliği gerekmektedir. Üretim sürekliliği ise doğal kaynakların varlığına, ekonomik yetkinliğe, kullanılan enerjinin yenilenebilir olup olmasına ve üretimin devamı için gerekli kaynakların sağlanıp sağlanamamasına bağlıdır. Dolayısıyla, sürdürülebilirlik için sürdürülebilir kalkınma, üretim, tüketim, tarım ve yönetim gibi farklı alt kavramlar üzerinde durulmaktadır.

Sürdürülebilir kalkınma ve ekonominin ana bileşenlerinden birisi olan sürdürülebilir üretim kavramı ilk defa 1992’de Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı’nda yer bulan bir kavramdır (Krajnc ve Glavič, 2003). Sürdürülebilir üretim kavramının sürdürülebilirlik kavramı gibi birden çok tanımları yapılmaktadır. Yapılan tanımlardan bir kısmı birbiri ile örtüşürken, bir kısmı birbirini tamamlar niteliktedir (Millar ve Russell, 2011). Diğer taraftan sürdürülebilir üretim, halihazırda üretim yapılarının gelişme süreçlerinde son aşama olarak kabul edilmektedir (Jovane vd., 2003).

Sürdürülebilir Üretim

Sürdürülebilir üretim, sürdürülebilirlikle paralel tanımlar içermektedir. Gelecek nesillerin ihtiyaçlarını ve taleplerini karşılayabilme potansiyelini azaltmadan, toplumun mevcut istek ve ihtiyaçlarını karşılayabilen üretim faaliyetidir

(De Ron, 1998). Devam eden ihtiyaçlar karşılanırken, ürün ve hizmetler, çevreyi kirletmeden, enerji ve doğal kaynaklar korunarak, en iktisadi şekilde, çalışanların, toplumun ve son tüketicinin güven içinde olduğu, çalışanların sosyal ve üretici haklarının korunduğu ve ödüllendirildiği bir üretim süreci ve sisteminin içerisinde üretilmesi sürdürülebilir üretimi sağlamaktadır³. Böyle bir üretim süreci, yeşil tasarımı, çevreye dost malzemenin kullanılmasını, üretim süreçlerinin en iyi hale getirilmesiyle kaynağın verimliliğinin artırılmasını ve aynı zamanda doğaya zararlı madde salınımını en aza indiren üretim sistemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır (Kang vd., 2016). Dolayısıyla sürdürülebilir üretim modelinde, hammadde temininden başlayarak, ürün tasarımı dahil olmak üzere, ürünün geri dönüşüm sürecinde sürdürülebilirlik amaçlanmaktadır. Üreticilerin sürdürülebilirliği gerçekleştirebilmesi adına, ürün zincirinin ana adımlarında, ürünün tasarımı, hammadde sağlanması, lojistiği, satışı, dağıtımı, ürünün kullanım süresinin dolması ve tüm süreçlerdeki atıkların imhası veya dönüştürülmesi gibi bütün süreçleri optimize ederek (De Ron, 1998), bu faaliyetlerini odağa çevreyi alarak, temiz üretim yeşil üretim şeklinde adlandırılan stratejiler geliştirilerek uygulamaları sürdürülebilir üretimin esasları olarak kabul edilebilir. Esasen, sürdürülebilir üretimin gereklerini yerine getirmek üzere yola çıkmak ve üretim süreci ve sonrasında bahsi geçen gereklilikleri yerine getirmek üretim ve örgüt kültürünün bu amaca olanak tanınması ile alakalıdır. Temiz ve yeşil üretim olarak adlandırılan modelin sürdürülebilirlik ile arasındaki bağlantının güçlenmesi ve uygulanabilmesi için, üretimi gerçekleştirerek bütün ayaklarda (ekonomi, politika, hukuk ve sosyal sistemlerde) buna uygun düşünme ve davranma yapısının oluşması gerekmektedir.

Mevcut üretim modellerinin geleneksel bir yaklaşımda olduğu düşünüldüğünde, sürdürülebilir üretimin gerçekleştirilmesi en iyi çözüm, yeni teknolojilere, işletme modellerinin yenilenmesine ve yeni bir yaşam biçiminin oluşmasına olan ihtiyacın karşılanmasıdır (Garetti ve Taisch, 2012). Bu sebeple çevrenin korunmasının temel alındığı üretimde, azaltma (reduce), yeniden kullanma (reuse) ve geri dönüşüm (recycle) olarak adlandırılan geleneksel 3R stratejisinin uygulaması ele alınabilir (Nakıboğlu, 2014). 3R stratejilerinin üretim sürecinde daha az kaynak kullanımı ve daha az kirlilik yaratması beklenmektedir. Aynı zamanda, 3R stratejileri kullanımının oranı söz konusu bir üretim modelinin çevreye karşı duyarlılığının ölçütü olarak kabul edilmektedir. Azaltma, yeniden kullanma ve geri dönüşüm kavramlarına, ürün kazanımı (recover), yeniden tasarım (redesign) ve yeniden üretim (remanufacturing) stratejileri de eklenip 6R yaklaşımı elde edilir. 6R temelli yaklaşımın, günümüzün lineer ekonomisinden farkı, çevre açısından tanımlanan sürdürülebilir üretimi döngüsel ekonomi ile açıklıyor oluşudur. Üretimde 6R stratejileri, üretimin öncesini, üretim sürecini, ürünün kullanımını ve kullanımından sonraki aşamaları ve birden fazla ürün döngüsünü dikkate alarak daha kapsamlı bir çerçeve çizen, inovatif bir sistem olarak görülmektedir (Sarkis ve Rasheed, 1995; Jawahir vd., 2006; Jawahir ve Bradley, 2016).

Üretimde yüksek karlılığın hedeflendiği ekonomik boyut, üretimin çevreye olumsuz etkilerinin azaltılmasının, sıfır emisyon oranına yönelindiği, fabrikaların lokal çevreleri üzerine pozitif etki yarattığı, hava ve su kalitesinin iyileştirildiği, yenilenebilir enerji ürettiği ve kullandığı, enerji için depo işlevi görmesinin amaçlandığı çevresel boyut, fabrikaların çalışanlar ile işbirliği içinde olduğu, öğrenme ve beşeri kapasitenin geliştirilmesine odaklandığı sosyal boyuttan oluşan sürdürülebilirlik, üretimin temel bileşenleri olması gerekmektedir (Herrmann vd., 2014). Bu amaca binaen Endüstri 4.0 teknolojileriyle, üretimin verimliliği ve ürünün kalitesinin artırılması ile sürdürülebilirliğin ekonomik ayağına; kullanılan malzeme ve enerji miktarının doğru seçilmesi ve takibinin yapılmasıyla sürdürülebilirliğin çevre ayağına; iş yükünün azaltılması, iş zenginleştirilmesi ve iş güvenliğinin ve sosyal güvenliğin sağlanması ile sürdürülebilirliğin sosyal ayağına katkı sunacağı düşünülmektedir (Braccini ve Margherita, 2019). Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanması ve geliştirilmesi her alanda olduğu gibi sürdürülebilir ekonomi alanında da önem arz etmektedir. Dolayısıyla içinde bulunduğumuz Endüstri 4.0'ın, evrimlerini dijitalleşme ve inovasyon üzerinden sürdürmektedir denilebilir.

İnovasyon

İnovasyon kavramının önemi, 20. yüzyıl başında ilk kez en çok bilinen teorisi “yaratıcı yıkım” olan Schumpeter tarafından vurgulandığından itibaren farklı tanımlanmıştır. Schumpeter inovasyonu, girişimcilerin ortaya koydukları yeniliklerle iktisadi dengeyi değiştirerek, yeniliklerin önünü açmaya temel olan bir yaratıcı yıkım olarak ifade etmiş, bunun kapitalizmin kilit noktası olduğunu vurgulamıştır (Ferreira vd., 2017; Maduegbuna, 2014). 2005 yılında, bütün yaklaşımlarda kullanılabilir tanımı, Avrupa İstatistik Ofisi (Eurostat- Organisation for Economic Cooperation and Development) ve Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD- Organisation for Economic Cooperation and Development) tarafından ortak olarak inovasyon tanımı yapılmıştır. İnovasyon, “iş uygulamalarında, iş yeri organizasyonunda ya da dış ilişkilerde; yeni veya önemli derecede geliştirilmiş bir ürünün (mal ya da hizmet) ya da sürecin, yeni bir pazarlama yöntemi ya da yeni bir organizasyonel yöntemin uygulanması” olarak The Oslo Manuel’de yer almıştır (OECD, 2005: 6). Literatürde, teknoloji inovasyonu, iş modeli inovasyonu, ürün inovasyonu,

³ Lowell Center for Sustainable Production (1998). Sustainable Production Defined. Erişim adresi: <https://www.uml.edu/Research/Lowell-Center/About/Sustainable-Production-Defined.aspx>, Erişim tarihi: 01.04.23.

süreç inovasyonu tasarım odaklı inovasyon, yıkıcı inovasyon, sorumlu inovasyon ve radikal inovasyon gibi çeşitli alt kavramlarla yer almaktadır. Görüldüğü üzere inovasyon sadece teknoloji içermekle kalmamakta aynı zamanda sosyal hayatı, kültürel ve kurumsal yapıyı etkileyen, kapsamı geniş, yeşil, ekonomik, net, kullanıcı odaklı, sade, maliyeti düşük, köklü, kamuyu kapsayan ve dönüştürme nitelikli özellikler barındırmaktadır (Edwards-Schachter, 2018). Sürdürülebilirlik bakımından literatürde inovasyonun türlerinin, çevresel ve sosyal boyutlarıyla derecelendirilip gruplandırılması da söz konusudur. Çevresel ve sosyal zorlukların varlığı bir inovasyonun sürdürülebilirliğini etkilemektedir. Dolayısıyla inovasyonun, bu zorlukları göz önünde bulundurma derecesine göre sürdürülebilirliği farklılık göstermektedir. Sosyal ve çevresel zorlukları yüksek ya da düşük şekilde dikkate alma aşaması ile dünyanın geleceğini nasıl etkileyeceği ve nasıl değiştireceğine dair tertipler ışığında dört farklı inovasyon türü tanımlanmıştır (Silvestre ve Tircă, 2019):

- ✓ Sosyal İnovasyonlar: Sosyal boyutun en üstte tutulduğu ve öncelik verildiği çevre ve ekonomik boyutun riske atıldığı inovasyonlar.
- ✓ Geleneksel İnovasyon: İnovasyonun geliştirilmesinde veya benimsenmesinde ekonomik boyutun öncelikli olduğu genellikle çevre ve sosyal boyutun riske atıldığı inovasyonlar.
- ✓ Sürdürülebilir İnovasyonlar: Çevre, sosyal ve ekonomik boyutların dikkate alınarak dengenin sağlanmasına özen gösterildiği inovasyon geliştirmeleri veya benimsemelerini içerir. Bu üç boyutun maksimizasyon şansı yoktur, fakat çevre, ekonomi ve sosyal boyutun beraber değerlendirildiği en iyi çözümün sağlanmasına müsaade eden inovasyonlar, sürdürülebilir inovasyon çalışmalarıdır.
- ✓ Yeşil inovasyonlar: Genel olarak çevre boyutunun öne çıkarılarak ekonomik ve sosyal boyutun riske atıldığı, çevre ve çevreye ilişkin önceliklerin dikkate alındığı inovasyonlar.

İnovasyon genel itibarıyla, küresel büyümeye ivme katmasıyla beraber, ekonomik büyümeye katkı sağlayan temel bir süreçtir. Ayrıca inovasyonun, şirketler ve ülkeler için sürdürülebilir rekabet avantajlarını içinde barındırdığı kabul edilmektedir. Tüm gelişmiş ekonomiler, inovasyonun sürekliliği mümkün yeniliklerle ekonomik büyüme motivasyonunu arttıracığı bilincini taşımaktadırlar. Diğer taraftan gelişmekte olan ülkeler, kendilerinin uluslararası rekabet arenasında güçlerini artırabilmek için inovasyon yolunu seçerek, endüstriyel modellerini devamlı olarak yükseltmeye yönelmektedirler (Chen vd., 2018). İnovasyonların gerçekleştirilebilmesi için ülkeler Ar-Ge çalışmalarına yatırım yaparak inovasyon potansiyellerini yükselterek rekabet güçlerini artırma çabası içerisinde olduklarıdır.

Endüstri 4.0 ile birlikte geliştirilen teknolojilerin, işletmelerde tasarım, üretim ve lojistik aşamalarında sürdürülebilirlik için uygulanabilmesi söz konusu olacaktır (Brito vd., 2019). Söz konusu teknolojilerle artık mümkün olan ve enerji tüketime yönelik uygulamalar ile sürdürülebilir üretim gerçekleşirken, çevresel ve ekonomik açıdan pozitif etki yaratacaktır. Endüstri 4.0 teknolojilerinden birisi olan sensörler, üretim sisteminde kullanıldığında, fazla işgücüne ihtiyaç duyulmaması, makinenin ürünü kontrol edebilme ve hatayı algılayabilme yeteneği sayesinde, gerekli önlemler alınarak hem ürünün kalitesinin artması hem de zaman ve kaynak tasarrufu sağlanarak sürdürülebilir üretim yaklaşımı uygulanmış olacaktır.

Çevre

Esasen iktisat literatüründe, Ar-Ge çalışmalarının kapsamı ve derinliği ekonomik büyümenin devamı için bir gereklilik olarak görülmektedir. Fakat, çevre açısından bakıldığında, ekonomik büyümenin fosil yakıt kullanımından kaynaklı olması çevresel bozulma için ana etkenlerden birisidir. 1990'lı yıllardan itibaren literatürde Çevresel Kuznets Eğrisi (Environmental Kuznets Curve - EKC) olarak isimlendirilen ters U şeklindeki bir fonksiyon araştırmalarda ekonomik büyüme ve emisyon salınımı arasındaki ilişki ele alınmıştır. Yapılan çalışmalarda Çevresel Kuznets Eğrisini doğrulayan ve doğrulamayan sonuçlar ortaya çıkmıştır. Fakat ampirik çalışmaların sonuçlarının yetersiz olduğu görülmektedir (Dogan ve Seker 2016; Fernáandez vd., 2018).

İçsel büyüme teorisi ile, teknolojik büyümenin çevre üzerine etkilerini, çevreyi kirleten kaynaklar yerine çevreye zarar vermeyen başka kaynakların kullanım kapasitesinin artırılması ile üretim süreçlerinin iyileştirilebileceği açıklanmıştır. İçsel büyüme modelleri, teknolojik ilerleme ve büyüme arasındaki ilişkiye çevresel açıdan bakarak, toplumun gelirinin artmasına bağlı olarak çevrenin korunmasına doğal kaynağın tahsis edildiği bir toplumu ifade etmektedir. Uyarılmış inovasyon sayesinde, teknolojinin kilit rol oynamasıyla, gelirler arttıkça emisyonların azaltılması mümkün olacaktır. Bu durumda inovasyon ekonomik büyüme fonksiyonunda ana değişkenlerden biri olmasının yanında çevre üzerindeki nihai etkisinin belirsiz olması söz konusudur. Çünkü, daha yüksek seviyedeki bir ekonomik gelişim aynı zamanda daha yüksek seviyede enerji tüketimini gerekli kılmaktadır. Yüksek bir enerji tüketimi içinde çevreyi kirletici enerji tüketiminin artması riskini de artıracaktır. Fakat yapılan inovasyon çalışmaları, enerjinin daha az tüketildiği ve hatta çevreye olan zararının daha az olduğu bir üretime imkan sağlayabilir. Bu aşamada inovatif bir süreç ile yapılan bu şekilde yeşil bir üretimin etkisinin net olarak belirlenmesi oldukça zor

gözükmektedir. Teknolojik inovasyonların emisyonlar üzerindeki etkisinin belirsizliğinin ortadan kalkması için sektörel ve ulusal araştırmalar yapılmaktadır. Yapılan araştırmaların büyük çoğunluğunda, çevreye dost ve çevreyi iyileştirmede Ar-Ge harcamalarının etkisinin nasıl olduğu üzerinde durulduğu görülmektedir. Diğer taraftan, Ar-Ge çalışmalarının toplamının emisyon azaltmaya yönelik katkısı üzerinde daha az odaklanılmaktadır (Fernández vd., 2018).

Toplumlarda üretimin artırılmasına yönelik çabalar hayat standartlarını daha iyi duruma getirme amacını taşısa da büyümenin ve gelişmenin çevreye yönelik önemli negatif dışsallıkları meydana gelmektedir. Özellikle başta petrol olmak üzere fosil yakıtların kullanımının hem iklim değişikliğine hem de çevresel kirlenmeye sebep olduğu görülmektedir. Ekonomideki mevcut gelişime paralel olarak üretimlerin pek çoğunun sürdürülebilir bir nitelikte olmadığı düşünülebilir. Endüstri sektörü yüksek kalitedeki ürünlerin üretimine devam ederken, sürdürülebilir üretim planlarına ve donanımlarına olan talepleri daha da artmaktadır. Bu aşamada Endüstri 4.0, sürdürülebilir üretim yapısı oluşturmak için mevcut bir strateji olarak kabul edilmektedir. Diğer taraftan Endüstri 4.0 kurumlarının üretime yönelik, ekonomik, çevresel ve sosyal etkileri de tartışma konusudur ve bu konularda araştırmalar devam etmektedir. Yapılmış olan bazı çalışmalarda, akıllı üretim sistemleri için gerekli olan kütleli veri setlerine ve bunun için de geniş ağ bantlarına ihtiyaç duyulduğu ifade edilmektedir. Dolayısıyla veri merkezleri yüksek oranda enerjiye gereksinim duymaktadır. Gerek duyulan enerji üretimi aşırı kaynak tüketimine yol açacağı için bu durumun çevreyi olumsuz etkileyeceği sonucuna ulaşılmaktadır. Bir diğer mesele inovatif sistem ve teçhizatların üretilmesinin çevreye fazladan bir yük getireceği belirtilmektedir (Waibel vd., 2017).

Bu açıdan bakıldığında literatürdeki birçok çalışmada, teknolojinin iki taraflı bir etkisinin olduğu görülmektedir. Teknoloji bir taraftan çevresel sorunların çözümü için çare olarak görülürken diğer taraftan çevresel sorunların nedeni olabildiği görülmektedir. Ancak, ekonomik sürdürülebilirlik için çevresel sürdürülebilirlik, çevresel sürdürülebilirlik için teknolojik yenilikler ve bu yeniliklerin üretilebildiği ve uygulanabildiği ekonomik büyüklüklerinin uygunluğu önem taşımaktadır. Bu sebeple, teknoloji çevresel sürdürülebilirlik adına kritik faktör olarak kabul edilebilir.

EKONOMETRİK UYGULAMA

Çalışmanın bu bölümünde, endüstri 4.0 teknolojilerinin, iklim değişikliğini hafifletici enerjileri içeren üretim biçimleri ve yeşil büyüme göstergelerinin ekonomik büyüme üzerine etkilerinin incelenmesi amacıyla, seçili OECD ülkeleri (Avustralya, Avusturya, Belçika, Kanada, Danimarka, Finlandiya, Fransa, Almanya, İrlanda, İtalya, Japonya, Lüksemburg, Hollanda, Norveç, Portekiz, İspanya ve İsveç) üzerine bir ekonometrik analiz yapılmıştır. Analizde kullanılan değişkenlere ait bilgiler tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Kullanılan Değişkenlere Ait Bilgiler

| Değişken | Tanımı | Kaynak |
|--|---|------------------------------------|
| GPC | Kişi başı GSYH | OECD veri bankası |
| LGPC | GPC değişkeninin doğal logaritması | Yazarlar tarafından hesaplanmıştır |
| RAE | Çevresel teknolojilerde göreceli avantaj | OECD veri bankası |
| ERDRD | Çevreyle ilgili devlet Ar-Ge bütçesi (toplam devlet Ar-Ge bütçesinin yüzdesi) | OECD veri bankası |
| DERTPC | Çevresel teknolojilerin gelişimi, kişi başına icat sayısı | OECD veri bankası |
| LDERTPC | DERTPC değişkeninin doğal logaritması | Yazarlar tarafından hesaplanmıştır |
| RES | Yenilenebilir enerji arzı (toplam enerji arzının yüzdesi) | OECD veri bankası |
| EODA | Çevresel Resmi Kalkınma Yardımı (toplam tahsis edilebilir Resmi Kalkınma Yardımlarının yüzdesi) | OECD veri bankası |
| Analize konu olan seçili OECD ülkeleri | | |
| Avustralya, Avusturya, Belçika, Kanada, Danimarka, Finlandiya, Fransa, Almanya, İrlanda, İtalya, Japonya, Lüksemburg, Hollanda, Norveç, Portekiz, İspanya ve İsveç | | |
| Analiz dönemi | | |
| 2000-2021 | | |

Birim Kök Testleri

Ekonometrik analizlerde kullanılan testler değişkenlerin durağanlık derecelerine karşı duyarlı olduğundan, analizde uygun model kullanabilmek için değişkenlerin durağanlığının incelenmesi gerekmektedir. Değişkenlerin durağanlıkları ise birim kök testleri yardımıyla incelenmektedir. Panel veri analizinde kullanılan birim kök testleri, serilerin yatay kesit bağımlılığı içerip içermemesine göre birinci ve ikinci nesil olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu nedenle, hangi birim kök testinin kullanılacağına yatay kesit bağımlılığının incelenmesi sonrasında karar verilmelidir. Analizde kullanılan veri setinde zaman boyutu (T=22) kesit boyutundan (N=17) büyük olduğundan, yatay kesit bağımlılığının incelenmesinde Breusch-Pagan LM testi kullanılmıştır ve test sonuçları tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Yatay Kesit Bağımlılığı

| Değişken | Test | İstatistik | s.d. | Olasılık |
|----------|------------------|------------|------|----------|
| LGPCR | Breusch-Pagan LM | 1886.700* | 136 | 0.0000 |
| RAE | Breusch-Pagan LM | 121.9264 | 136 | 0.8006 |
| ERDRD | Breusch-Pagan LM | 391.6179* | 136 | 0.0000 |
| LDERTPC | Breusch-Pagan LM | 186.4234* | 136 | 0.0027 |
| RES | Breusch-Pagan LM | 1930.963* | 136 | 0.0000 |
| EODA | Breusch-Pagan LM | 700.0479* | 136 | 0.0000 |

Not: *, %1 düzeyinde anlamlılığı ifade etmektedir.

Breusch-Pagan LM testi sonuçlarına göre RAE değişkeni yatay kesit bağımlılığı içermezken diğer değişkenler yatay kesit bağımlılığı içermektedir. Bu nedenle, RAE değişkeni için birinci nesil diğer değişkenler için ikinci nesil birim kök testi uygulanmalıdır. Uygulanan birim kök testlerinin sonuçları tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Birim Kök Test Sonuçları

| Pesaran Panel Birim Kök Testi (CIPS) | | | | |
|---|----------|----------|---------|----------|
| Değişken | Trendsiz | | Trendli | |
| | Zt-bar | Olasılık | Zt-bar | Olasılık |
| LGPCR | 2.760 | 0.997 | 4.082 | 1.000 |
| DLGPCR | -5.711* | 0.000 | -4.37*0 | 0.000 |
| ERDRD | 1.818 | 0.966 | -0.173 | 0.431 |
| DERDRD | -1.796** | 0.036 | -3.264* | 0.001 |
| LDERTPC | 1.364 | 0.914 | 0.964 | 0.833 |
| DLERTPC | -9.806* | 0.000 | -7.695* | 0.000 |
| RES | 1.284 | 0.900 | 2.275 | 0.989 |
| DRES | -5.096* | 0.000 | -6.032* | 0.000 |
| EODA | -0.954 | 0.170 | -0.207 | 0.418 |
| DEODA | -5.772* | 0.000 | -4.159* | 0.000 |
| Maddala ve Wu (1999) Panel Birim Kök Testi (MW) | | | | |
| RAE | 44.922 | 0.100 | 33.962 | 0.470 |
| DRAE | 63.655* | 0.002 | 83.646* | 0.000 |

Not: * ve **, sırasıyla %1 ve %5 düzeyinde anlamlılığı ifade etmektedir.

Uygun birim kök testlerinin uygulanması sonucunda, değişkenlerin hepsinin birinci dereceden durağan olduğu görülmektedir.

Eş Bütünleşme Testleri

Yukarıda belirtildiği gibi ekonometrik analizlerde kullanılan testler değişkenlerin durağanlığı ile ilgili farklı varsayımlara sahiptir. Durağanlık incelemesi yapılarak hangi testin kullanılması gerektiği belirlenebilir. Uygulanan birim kök testleri sonucunda değişkenlerin hepsinin birinci dereceden bütünleşik yani I(1) olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, değişkenler arasındaki ilişkinin varlığı eş bütünleşme testleri yardımı ile incelenmelidir. Bu bilgiler doğrultusunda değişkenler arasındaki ilişkinin incelenmesinde Johansen Fisher panel eş bütünleşme testi ve Kao eş bütünleşme testinden faydalanılmıştır. Her iki eş bütünleşme testine ait sonuçlar tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4: Eş Bütünleşme Test Sonuçları

| Değişkenler: LGPCR EODA ERDRD RAE RES LDERTPC | | | | |
|---|----------------|----------------|-------------------|----------|
| Johansen Fisher Panel eş bütünleşme testi | | | | |
| Varsayılan eş bütünleşme sayısı | Özdeğer | İz istatistiği | 0.05 kritik değer | Olasılık |
| Hiç yok | 591.2 | 0.0000 | 375.1 | 0.0000 |
| En fazla 1 | 403.4 | 0.0000 | 263.7 | 0.0000 |
| En fazla 2 | 256.1 | 0.0000 | 209.7 | 0.0000 |
| En fazla 3 | 97.98 | 0.0000 | 74.33 | 0.0001 |
| En fazla 4 | 55.45 | 0.0115 | 56.56 | 0.0089 |
| En fazla 5 | 22.50 | 0.9344 | 22.50 | 0.9344 |
| Kao kalıtsal eş bütünleşme testi | | | | |
| | t- istatistiği | | Olasılık | |
| ADF | -2.003676* | | 0.0226 | |

Not: *, %5 düzeyinde anlamlılığı ifade etmektedir.

Johansen Fisher panel eş bütünleşme testinde değişkenler arasında en fazla dört tane eş bütünleşmeye kadar olan varsayımları %5 düzeyinde reddedilirken, en fazla beş tane eş bütünleşme olduğu varsayımını reddedilememiştir. Bu ise Johansen Fisher panel eş bütünleşme testine göre değişkenler arasında eş bütünleşme olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde Kao eş bütünleşme testi sıfır hipotezi (yani, değişkenler arasında eş bütünleşme olmadığı) %5 anlamlılık düzeyinde reddedilmiştir. Dolayısıyla, her iki eş bütünleşme testi sonucunda değişkenler arasında uzun dönem ilişkisi olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Bağımsız değişkenlerin uzun dönemde bağımlı değişkeni nasıl etkilediğini ve etki katsayılarını belirlemek için FMOLS testi uygulanmıştır. FMOLS sonuçları tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5: FMOLS Sonuçları

| Bağımlı değişken: LGPCR | | |
|-------------------------|-------------|----------|
| Değişken | Katsayı | Olasılık |
| EODA | 0.000952* | 0.000299 |
| ERDRD | 0.013529* | 0.006968 |
| RAE | -0.029279** | 0.012248 |
| RES | 0.008029* | 0.001181 |
| LDERTPC | -0.000182* | 0.003001 |
| R-kare | | 0.948714 |
| Düzeltilmiş R-kare | | 0.945317 |

Not: * ve **, sırasıyla %1 ve %5 düzeyinde anlamlılığı ifade etmektedir.

Tablo 5’te verilen FMOLS sonuçlarında görüldüğü gibi, bağımsız değişkenlerin hepsinin katsayıları anlamlı çıkmıştır. Bu katsayılara göre, yenilenebilir enerji arzı yüzdesi, çevresel Ar-Ge bütçesi, çevresel resmi kalkınma yardımları ve çevre ile alakalı kişi başı icat sayısında görülecek artışlar kişi başı milli gelirin artmasını sağlarken, çevresel teknolojilerdeki göreceli avantajda görülecek artışlar kişi başı millî gelire olumsuz etki edecektir.

SONUÇ

Çalışmada Endüstri 4.0 teknolojilerinin üretim, dağıtım, kullanım ve geri dönüşüm aşamalarında ekolojik dengeye duyarlı ve uygun “yeşil ekonomi” kapsamında yeşil teknoloji göstergeleri olan toplam enerji arzı içerisinde yenilenebilir enerji arzının ekonomik büyümeyi olumlu etkilemesi, ekonomilerin sürdürülebilirliği için gelecek adına umut vaat edicidir. Çünkü üretimin devamı için enerji en temel girdi olması sebebiyle, toplam enerji arzı içinde, yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının arzı arttıkça doğaya zarar vermeyen üretimde artacaktır. Böylece çevre, ekonomi ve üretimin birbirine olan bağımlı döngüsü sağlıklı devam edecektir.

Ülkeler, çevreye yönelik teknolojilerin geliştirilebilmesi için bütçelerinden Ar-Ge payı ve çevresel birtakım yardımlar ayırmaktadırlar. Yenilenebilir enerji kullanımının artması ve Endüstri 4.0 teknolojileri ile enerji kullanımının azalması ve aynı zamanda teknoloji sayesinde çevreye zarar vermeyen hammadde kullanımının sürmesi ekonomik sürdürülebilirlik ve ekolojik denge açısından oldukça önemlidir. Çalışmada çevresel bütçe Ar-Ge payı ve çevresel resmi yardımların payı arttıkça kişi başına düşen milli gelirin de artarak ekonomik büyümenin devam ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Söz konusu sonuç, çevresel endüstri 4.0 teknolojilerinin geliştirilmeye devam edilmesinin ekonomik sürdürülebilirlik için gereklilik olduğunu desteklemektedir.

KAYNAKÇA

Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(3), 899-919. doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006.

Braccini, A., & Margherita, E. (2019). Exploring organizational sustainability of industry 4.0 under the triple bottom line: The case of a manufacturing company. *Sustainability*, 11(1), 36. doi.org/10.3390/su11010036.

Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International journal of mechanical, industrial science and engineering*, 8(1), 37-44.

Brito, M.F., Ramos, A.L., Carneiro, P., & Gonçalves, M.A. (2019). Ergonomic Analysis in Lean Manufacturing and Industry 4.0—A Systematic Review. Alves A., Kahlen FJ., Flumerfelt S., Siriban-Manalang A. (eds.). In *Lean Engineering for Global Development* (pp. 95-127). Switzerland: Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-030-13515-7_4.

Carvalho, N., Chaim, O., Cazarini, E., & Gerolamo, M. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in sustainable manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 21, 671-678.

Cengiz, Ö. (2018). Endüstri 4.0: Üretim Anlayışında Yaşanan Gelişmeler. (Ed. Özyakışır, D. ; Aybas, M.) *Endüstri 4.0 Üzerine Yazılar*. Savaş Kitabevi. Ankara.

Chen, J., Yin, X. & Mei, L. (2018). Holistic innovation: An emerging innovation paradigm. *International Journal of Innovation Studies*, 2, 1-13. Doi: https://doi.org/10.1016/j.ijis.2018.02.001

Choi, S., & Ng, A. (2011). Environmental and economic dimensions of sustainability and price effects on consumer responses. *Journal of business ethics*, 104(2), 269-282. doi.org/10.1007/s10551-011-0908-8.

- De Ron, A. J. (1998). Sustainable production: the ultimate result of a continuous improvement. *International Journal of Production Economics*, 56, 99-110.
- Dogan, E. & Seker, F. (2016). Determinants of CO2 emissions in the European Union: The role of renewable and non-renewable energy. *Renewable Energy*, 94, 429-439. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.078>
- Edwards-Schachter, M. (2018). The nature and variety of innovation. *International Journal of Innovation Studies*, 2, 65-79. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijis.2018.08.004>
- Ehrenfeld, J.R. (2005). The roots of sustainability. *MIT Sloan Management Review*, 46(2), 23
- Fallera, C., & Feldmüllera, D. (2015). Industry 4.0 learning factory for regional SMEs. *The 5th Conference on Learning Factories - Procedia CIRP*, 32, 88–91.
- Fernández, Y. F., López, M. A. F. & Blanco, B. O. (2018). Innovation for sustainability: The impact of R&D spending on CO2 emissions. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3459-3467. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.001>
- Firat, O. Z. ve Firat, S. Ü. (2017a). Endüstri 4.0 yolculuğunda trendler ve robotlar. *Istanbul University Journal of the School of Business*, 46-2, Endüstri Mühendisliği 31(0), 44-58, 2020
- Ferreira, M. P., Reis, N. R., Pinto, C. F. (2017) 'Schumpeter's Influence on Entrepreneurship and Management', *Research Revista de Empreendedorismo e Gestão de Pequenas Empresas*, V.6,N.1, 4-39.
- Garetti, M., & Taisch, M. (2012). Sustainable manufacturing: trends and research challenges. *Production Planning & Control*, 23(2-3), 83-104. doi.org/ 10.1080/09537287.2011.591619.
- Goodland, R. (1995). The concept of environmental sustainability. *Annual review of ecology and systematics*, 26(1), 1-24.
- Herrmann, C., Schmidt, C., Kurle, D., Blume, S., & Thiede, S. (2014). Sustainability in manufacturing and factories of the future. *International Journal of precision engineering and manufacturing-green technology*, 1(4), 283-292. doi.org/10.1007/s40684-014-0034-z
- Jawahir, I.S., & Bradley, R. (2016). Technological elements of circular economy and the principles of 6R-based closed-loop material flow in sustainable manufacturing. *Procedia CIRP*, 40, 103-108. doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.067
- Jawahir, I.S., Dillon, O.W., Rouch, K.E., Joshi, K.J., Venkatachalam, A., & Jaafar, I.H. (2006, September). Total life-cycle considerations in product design for sustainability: A framework for comprehensive evaluation. In *Proceedings of the 10th International Research/Expert Conference*, (pp. 1-10). Barcelona, Spain.
- Jovane, F., Koren, Y., & Boer, C.R. (2003). Present and future of flexible automation: towards new paradigms. *CIRP Annals*, 52(2), 543-560.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013a). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group. Berlin: Forschungsunion im Stifterverband für die Deutsche Wirtschafte.V
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., Kim, B., H., & Do Noh, S. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(1), 111-128. doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5.
- Krajnc, D., & Glavič, P. (2003). Indicators of sustainable production. *Clean technologies and environmental policy*, 5(3-4), 279-288. doi.org/10.1007/s10098-003-0221-z
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6(4), 239-242. doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10.
- MacDougall, W. (2014). *Industrie 4.0: Smart manufacturing for the future*. Germany Trade & Invest.
- Maddala, G. S., & Wu, S. (1999). A comparative study of unit root tests with panel data and a new simple test. *Oxford Bulletin of Economics and statistics*, 61(S1), 631-652.

- McMichael, A.J., Butler, C.D., & Folke, C. (2003). New visions for addressing sustainability. *Science*, 302(5652), 1919-1920
- Millar, H.H., & Russell, S.N. (2011). The adoption of sustainable manufacturing practices in the Caribbean. *Business Strategy and the Environment*, 20(8), 512-526. doi.org/10.1002/bse.707
- Morrar, R., Arman, H., & Mousa, S. (2017). The Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0) A Social Innovation Perspective. *Technology Innovation Management Review*, 7(11), 12-20.
- Maduegbuna, A. N. (2014) 'Creative Destruction: The Essence of Entrepreneurial Studies', *IOSR Journal of Economics and Finance*, Volume 5, Issue 3.61-65.
- Nakıboğlu, G. (2014). Üretimde Çevreye Duyarlı Yaklaşım. (Ed: Günaydın, İ.; Özsoy, T.) *Disiplinler Arası Bakış Açısı İle Çevre*, 2, 202. İstanbul: Hiperlink Yayınevi.
- OECD (2005). *Oslo Manual: Guidelines for collecting and interpreting innovation data* (3rd ed.). Paris, France: OECD Publishing.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston Consulting Group*, 9(1), 54-89.
- Tıraş, H. (2012). Sürdürülebilir kalkınma ve çevre: Teorik bir inceleme. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 2(2), 57-73.
- Sarkis, J., & Rasheed, A. (1995). Greening the manufacturing function. *Business Horizons*, 38(5), 17-27
- Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Crown Business, NY.
- Sheth, J.N., Sethia, N.K., & Srinivas, S. (2011). Mindful consumption: a customer-centric approach to sustainability. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 39(1), 21-39
- Silvestre, B. S. & Tircă, D. M. (2019). Innovations for sustainable development: Moving toward a sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, 208, 325-332. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.244>
- Sung, T.K. (2017). Industry 4.0: A Korea perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 40-45. doi.org/10.1016/j.techfore.2017.11.005
- UN (1987). *Gathering a Body of Global Agreements, Development and International Co-operation: Environment Report of the World Commission on Environment and Development, Note by the Secretary-General, Our Common Future*, Distr: General 4 August 1987, A/42/427, <http://www.un-documents.net/ocf-ov.htm> Erişim Tarihi: 01.03.2018.
- Waibel, M. W., Steenkamp, L. P., Moloko, N. & Oosthuizen, G. A. (2017). Investigating the effects of Smart Production Systems on sustainability elements. *Procedia Manufacturing*, 8, 731-737. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.094>
- White, M.A. (2013). Sustainability: I know it when I see it. *Ecological Economics*, 86, 213-217
- Yılmaz, A. (2019). *Yapay Zeka, Kodlab Yayın Dağıtım ve Hizmetleri*, İstanbul.