



Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi

The International Journal of Economic and Social Research

2024, 20(1)

Dijital Dönüşüm Çağında İmalat: Sürdürülebilirlik 4.0

In the Age of Digital Transformation in Manufacturing: Sustainability 4.0

Munise Tuba AKTAŞ¹ , Talha KUTAY² 

Geliş Tarihi (Received): 11.10.2023

Kabul Tarihi (Accepted): 19.01.2024

Yayın Tarihi (Published): 25.06.2024

Özet: Çevresel felaketlerle daha yoğun ve sık karşılaştığımız bu günlerde rekabet ve sürdürülebilir büyümeye odaklanmanın yanında sürdürülebilirliği bütüncül bir yaklaşımla ele alma ihtiyacı açık biçimde görülmektedir. Üretimi merkeze alan Sanayi 4.0'da üretimin sürdürülebilirliği kilit unsur olarak kabul edilmektedir. Güncel gelişmeler doğrultusunda bu çalışmada Sanayi 4.0 ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişkinin ortaya koyulması amaçlanmaktadır. Bahsi geçen amacın gerçekleştirilmesi için literatür taramasına odaklanılmıştır. Özellikle Sanayi 4.0 ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi ele alan Türkçe çalışmaların azlığından dolayı literatür taraması ağırlıklı olarak İngilizce çalışmalar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Literatür incelendiğinde yaygın olarak Sanayi 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirliği olumlu yönde etkileyeceğinin ifade edildiği görülmektedir. Özellikle son yılların güncel tartışma konusu olan Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH)'ne ulaşılma sürecinde Sürdürülebilirlik 4.0'ın önemli bir araç olabileceği literatürdeki çalışmalardan anlaşılmaktadır. Türkçe literatür incelendiğinde Sanayi 4.0 ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiye odaklanan çalışmaların azlığı göze çarpmaktadır. Bu nedenle çalışmanın ilgili yazındaki tartışmalara önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dijitalleşme, Sürdürülebilirlik 4.0, Sanayi 4.0, Sürdürülebilir Kalkınma, İmalat

&

Abstract: In these times when we are increasingly and frequently confronted with environmental disasters, there is an evident need to address sustainability with a holistic approach, alongside focusing on competition and sustainable growth. In Industry 4.0, which focuses on production, sustainability is considered a key factor. In line with recent developments, this study aims to establish the relationship between Industry 4.0 and sustainability. In order to achieve the mentioned objective, a literature review has been focused. Especially due to the scarcity of Turkish studies addressing the relationship between Industry 4.0 and sustainability, the literature review has predominantly focused on English works. When the literature is examined, it is predominantly expressed that Industry 4.0 technologies will have a positive impact on sustainability. Especially in recent years, it is understood from the literature that Sustainability 4.0 can be an important tool in the process of achieving Sustainable Development Goals (SDGs), which have been a prominent topic of discussion. When reviewing the Turkish literature, it is evident that there is a scarcity of studies focusing on the relationship between Industry 4.0 and sustainability. Therefore, it is believed that this study will make a significant contribution to the ongoing discussions in the relevant literature.

Keywords: Digitization, Sustainability 4.0, Industry 4.0, Sustainable Development, Manufacturing

Atıf/Cite as: Aktaş, M. T. & Kutay, T. (2024). Dijital Dönüşüm Çağında İmalat: Sürdürülebilirlik 4.0, *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*. 20(1). 37-61.

İntihal-Plagiarizm/Etik-Ethic: Bu makale, en az iki hakem tarafından incelenmiş ve intihal içermediği, araştırma ve yayın etiğine uyulduğu teyit edilmiştir. / This article has been reviewed by at least two referees and it has been confirmed that it is plagiarism-free and complies with research and publication ethics. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijaws>

Copyright © Published by Bolu Abant İzzet Baysal University, Since 2005 – Bolu

¹ Doç. Dr., Anadolu Üniversitesi, İktisat Bölümü, mtturker@anadolu.edu.tr

² Yüksek Lisans Öğrencisi, Anadolu Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İktisat ABD, talhakutayfb@gmail.com

1. Giriş

Sanayi 4.0, Almanya tarafından 2011 yılında, ileri teknolojiye dayalı yeni bir sanayi politikası öncülüğünde rekabet gücünü artırmaya yönelik bir strateji olarak geliştirilmiştir. Üretim yapılarının bilişim teknolojileri kullanılarak dijital sistemlere dönüştürülmesini ifade eden Industrie 4.0 (Sanayi 4.0), Alman hükümetinin Yüksek Teknolojisi Stratejisi 2020 Eylem Planı'nın bir parçası olarak kabul edilmiştir (Romero Gázquez vd., 2021; Suswanto vd., 2019; Zaharah vd., 2018; Wang vd., 2016). Çeşitli ülkeler tarafından Sanayi 4.0'a koşut olarak, Endüstriyel İnternet veya Gelişmiş Üretim Ortaklığı (Amerika Birleşik Devletleri (ABD)), Yüksek Değerli Üretim (İngiltere), Nouvelle France Industrielle veya Industrie du Futur (Fransa), Produktion 2030 (İsveç), Fabbrica Intelligente (İtalya), Industria Conectada 4.0 (İspanya), Produktion der Zukufunt (Avusturya), Rumo a Industria 4.0 (Brezilya) ve İnternet + (Çin) gibi çeşitli kavramlar geliştirilmiş ve hükümet politikalarında yer edinmeye başlamıştır (Yıldırım, 2019; Wang vd., 2016). Akıllı, esnek, kaliteli ve düşük maliyetli üretimle öne çıkan Sanayi 4.0 özellikle ileri teknolojik dönüşümün sürdürülebilirlik konusunda sunduğu potansiyel fırsatlarla da incelenmeye değerdir. Örneğin, Güney Kore, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Çin'in Sanayi 4.0'a adapte süreçlerinde sürdürülebilir üretim, yeşil teknoloji, sürdürülebilir enerji, biyo-teknoloji ve alternatif enerji kaynaklarına yönelik politikalar önemli rol oynamıştır (Bağcı, 2018; Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2019). Geleneksel sanayi uygulamalarının ve teknolojilerinin yarattığı ekolojik ve sosyal kısıtlamaların çoğuna çözüm getirme potansiyeline sahip olan Sanayi 4.0, daha sürdürülebilir bir gelecek sunma imkânını bünyesinde barındırmaktadır (Bai vd., 2020). Sanayi 4.0; yeşil ürünlerin, yeşil üretim süreçlerinin ve yeşil tedarik zinciri yönetiminin geliştirilmesine imkân tanıyarak çevresel açıdan sürdürülebilir üretimi sağlayabilecektir (De-Souso Jabbour vd., 2018). Sanayi 4.0'da üretim sistemlerinin ekolojik sürdürülebilirliğinin ana hedef olarak açıkça belirtilmemesine rağmen (Erol, 2016) temel olarak kaynak ve enerji etkinliğinde ve geri dönüşümde önemli ekolojik fırsatlar yaratacağı ifade edilmektedir (Aktaş, 2021: 115). Sürdürülebilirliğin Sanayi 4.0 teknolojileriyle bütünleştirilmesi sürdürülebilir Sanayi 4.0 sürecine geçişin başarılı şekilde gerçekleştirilmesine imkân sağlayacaktır (Kluczek vd., 2023). Sanayi 4.0, işin tüm yönlerinin stratejik dönüşümünü temsil etmekte, teknolojinin paydaşlara değer yaratıp sunabileceği yeni bir ekosistem oluşturmakta ve şirketlerin değişen koşullara daha hızlı adapte olmalarına olanak tanımaktadır (Machado vd., 2021: 168). Ancak bir çok şirket hâlen Sanayi 4.0'ı sadece teknolojinin ilerlemesi olarak anlamakta ve bu süreci hem somut (insanlar) hem de soyut kaynakları içeren tüm iş alanlarının dönüşümü olarak görmemektedir (Ali ve Johl, 2023: 839). Olah ve diğerlerine (2020) göre Sanayi 4.0'ın, fırsatları ve zorlukları hala belirsizdir ve çevresel sürdürülebilirlik açısından bu endüstriyle ilişkilendirilen teknolojiler henüz yeterince keşfedilmemiştir. Bu nedenle, Sanayi 4.0'ın uzun vadede Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH)'yle nasıl bütünleştirileceği konusunda hâlâ belirsizlik bulunmaktadır (Olah vd., 2020). Dolayısıyla Sanayi 4.0'ın üretim sistemi üzerindeki ekonomik, çevresel ve toplumsal etkilerinin daha fazla araştırılması gerekmektedir.

Sanayi 4.0'ın toplumlar üzerindeki etkisine dair tartışmaların yoğunlaşması Buhr'un (2017: 3) sorduğu soruyu akla getirmektedir: Sanayi 4.0'dan nasıl daha fazla insanın yararlanmasını sağlayabiliriz? Çevresel felaketlerle daha yoğun ve sık karşılaştığımız, küresel iklim değişikliğinin etkileriyle yüzleştiğimiz bu günlerde rekabet ve sürdürülebilir büyümeye odaklanmanın yanında sürdürülebilirliği bütüncül bir yaklaşımla ele alma ihtiyacı açık bir biçimde görülmektedir. Bu farkındalığın son zamanlarda literatüre de yansıdığı ve Sanayi 4.0 ile sürdürülebilirlik arasındaki ilişkinin tartışılmaya, nicel ve nitel araştırmalarla değerlendirilmeye çalışıldığı anlaşılmaktadır. Ekonomi 4.0, Çalışma 4.0 ve Öğrenme 4.0 terimlerinin yoğun endüstriyel siyasi tartışmaların konusu haline geldiği günümüzde Sürdürülebilirlik 4.0'da yoğun bir şekilde tartışılmaktadır (Spöttl ve Windelband, 2020). Bu çalışmanın temel amacı, Sanayi 4.0 ile sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktır. Sürdürülebilirlik ile Sanayi 4.0 arasındaki bağlantıyı kurmaya odaklanan çalışmaların azlığı bu konuya yoğunlaşmamızı sağlamıştır. Bu açıdan çalışmanın özellikle Türkçe literatüre önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışma kapsamında sürdürülebilirlik ihtiyacı ve sürdürülebilir imalat (Sürdürülebilirlik 4.0) kavramları incelendikten sonra Sürdürülebilirlik 4.0'ın Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH)'ne ulaşma sürecine ne tür bir katkı sağlayabileceği literatürdeki çalışmalara dayalı olarak ele alınacaktır.

2. Sürdürülebilirlik ve Sürdürülebilir Kalkınma

Sürdürülebilirliğe ilişkin kaygılar Malthus ve Jevons gibi kimi 18. ve 19. yüzyıl iktisatçılarına kadar götürülebilse de sürdürülebilir kalkınma kavramının doğuşu 20. yüzyılda çevreye ilişkin kaygıların ortaya çıkışına rastlamaktadır (Yeni, 2014: 183). 1972 yılında yayımlanan Büyümenin Sınırları (Limits to Growth) başlıklı rapor, çevresel kısıtlarla uyumlu sürdürülebilir bir ilerleme süreci için toplumun önündeki seçeneklere dikkat çekerek, sınırsız ve kontrol edilmeyen bir büyümeyle dünyanın kısıtlı kaynakları arasındaki çelişkiyi ilk defa ortaya koymuştur. Aynı yıl gerçekleştirilen Stockholm Konferansı'nda ise gelişmiş ve az gelişmiş ülkeler arasındaki farklılıklar giderilmedikçe, çevresel koşullarda iyileşmenin sağlanamayacağı, kalkınmanın çevreyi korumakla çelişen bir niteliğinin olmadığı tartışılmıştır (Lazol vd., 2008: 58). Bahsi geçen dönemde sürdürülebilir kalkınmaya doğru bir yönelimin olduğu görülse de özellikle Büyümenin Sınırları raporunu eleştirenler gelişen teknolojinin ve ortaya çıkan yeniliklerin çevresel sorunlara çözüm olacağını öne sürmüşlerdir. Söz konusu dönemde sürdürülebilir kalkınma yaklaşımına keskin bir geçişin olmadığı görülmektedir. Kökleri, 1980 yılında Uluslararası Doğayı ve Doğal Kaynakları Koruma Birliği tarafından hazırlanan Dünya Koruma Stratejisi (World Conservation Strategy) adlı rapora dayanan sürdürülebilir kalkınma kavramının genel kabul görmesi ise Dünya Çevre Kalkınma Komisyonu'nun 1987 yılında yayımladığı Ortak Geleceğimiz başlıklı raporuyla gerçekleşmiştir (Yeni, 2014). Bu raporda sürdürülebilir kalkınmanın tanımı yapılmıştır. Sürdürülebilir kalkınma gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama kabiliyetini tehlikeye atmadan mevcut nesillerin ihtiyaçlarının karşılanması olarak ifade edilmiştir. Söz konusu tanımda, iki temel kavram ön plana çıkmaktadır. Bu kavramlar, dünyadaki yoksulların temel ihtiyaçlarına öncelik verilmesine vurgu yapan "ihtiyaçlar" kavramı ile teknoloji ve sosyal organizasyonla ilişkili "sınırlamalar" kavramıdır. Sınırlama, mevcut ve gelecekteki nesillerin ihtiyaçlarını karşılamada çevresel kabiliyetin sınırlarını belirleyen teknoloji ve sosyal organizasyonu ifade etmektedir (WCED, 1987). Kısacası bugünkü iktisadi kalkınmanın, gelecek nesilleri bugünkü nesillerin gerisinde bırakmamayı güvence altına alması gerekmektedir (Barbier, 2011). Bu tanım, kalkınmanın uzun dönemli olası sonuçlarına dikkat çekmek açısından yararlı olsa bile, "gereksinimler nelerdir ve zaman içinde nasıl değişecektir? Gelecek kuşakların elinde bulunacak seçeneklerden hangilerindeki azalma kabul edilebilir hangilerindeki azalma kabul edilemez?" gibi sorulara değinmemektedir. Fakat rapor, uygulanan ekonomi politikaları sonucunda ortaya çıkan çevresel bozulmanın sürdürülebilirlik bakış açısının temel kaygılarından biri olduğunun ipuçlarını vermektedir (Yeni, 2014: 184). Ayrıca raporda, sürdürülebilir kalkınmanın, tüm bireylerin temel ihtiyaçlarını karşılamayı ve herkese daha iyi bir yaşam için arzularını gerçekleştirme fırsatını sunmayı amaçladığı aktarılmaktadır (WCED, 1987).

1992 yılında toplanan Rio Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı'nın sonunda Rio Deklarasyonu ve Gündem 21 olmak üzere iki belge ortaya konulmuştur. Rio Deklarasyonu'nun birinci ilkesinde sürdürülebilir kalkınmanın öneminden bahsedilirken, üçüncü ilkesinde kalkınma hakkının şimdiki ve gelecek nesillerin kalkınmacı ve çevresel ihtiyaçlarını eşitlikçi bir şekilde karşılanmasına yönelik olarak kullanılması gerektiği ifade edilmekte ve dördüncü ilkesinde ise sürdürülebilir kalkınmayı başarmak amacıyla çevresel korumanın kalkınma sürecinin gerekli bir kısmını oluşturması gerektiği belirtilmektedir (BM, 1992). Sürdürülebilir kalkınmaya dair çabalar, sonrasında ilk yaptırım destekli Çevre Antlaşması olan Kyoto Protokolü'nde (1997) vücut bulmuştur. Ardından, 2009 Kopenhag İklim Değişiklikler Zirvesi, 2012'de Katar'ın Doha kentinde yapılan toplantı ve 2015 yılında yürürlüğe giren Paris Antlaşması gibi küresel işbirlikleri gerçekleştirilmiştir (Özcan, 2020). Bu protokoller ve toplantılar dikkate alınarak Birleşmiş Milletler tarafından 17 tane Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi (SKH) belirlenmiştir. 2030 yılına kadar ulaşılması beklenen hedefler Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri

SKH-1	Yoksulluğun tüm türlerinin her yerde ortadan kaldırılması
SKH-2	Açlığın sona erdirilmesi, herkesin yeterli ve dengeli beslenmesinin sağlanması; gıda güvenliği ve sürdürülebilir tarımın desteklenmesi
SKH-3	Herkesin sağlıklı yaşam sürmesinin sağlanması ve her yaşta esenliğin desteklenmesi
SKH-4	Kapsayıcı ve eşitlikçi, nitelikli eğitimin güvence altına alınması ve herkes için yaşam boyu öğrenimin desteklenmesi
SKH-5	Toplumsal cinsiyet eşitliğinin sağlanması, tüm kadınların ve kız çocuklarının güçlendirilmesi
SKH-6	Herkes için temiz suya erişilebilirliğin, sanitasyonunun sağlanması ve sürdürülebilir yönetiminin güvence altına alınması
SKH-7	Herkes için uygun fiyatlı, güvenilir, sürdürülebilir ve modern enerjinin güvence altına alınması
SKH-8	Kesintisiz kapsayıcı ve sürdürülebilir ekonomik büyümenin, tam ve üretken istihdamın ve herkes için insana yakışır işlerin desteklenmesi
SKH-9	Dayanıklı altyapıların inşası, kapsayıcı ve sürdürülebilir sanayileşmenin desteklenmesi ve inovasyonun güçlendirilmesi
SKH-10	Ülkeler içinde ve arasında eşitsizliklerin azaltılması
SKH-11	Şehirlerin ve insan yerleşimlerinin kapsayıcı, güvenli, dayanıklı ve sürdürülebilir kılınması
SKH-12	Sürdürülebilir tüketim ve üretim kalıplarının güvence altına alınması
SKH-13	İklim değişikliği ve etkileri ile mücadele konusunda acilen eyleme geçilmesi
SKH-14	Sürdürülebilir kalkınma için okyanuslar, denizler ve deniz kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir kullanımı
SKH-15	Karasal ekosistemlerin sürdürülebilirliğinin sağlanması, ormanların sürdürülebilir yönetimi, çölleşme ile mücadele, karasal bozulmanın durdurulması ve iyileştirilmesi, biyo-çeşitlilik kaybının engellenmesi
SKH-16	Sürdürülebilir kalkınma için barışçı ve kapsayıcı toplumların desteklenmesi, herkes için adalet erişiminin sağlanması ve her düzeyde etkili, hesap verebilir, kapsayıcı kurumların inşası
SKH-17	Uygulama araçlarının güçlendirilmesi ve kalkınma için küresel işbirliğinin teşvik edilmesi

Kaynak: Tablo, Eşkinat'a (2016) dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Sürdürülebilir kalkınma, OECD (2011) tarafından kalkınma süreçlerinin ekonomik, çevresel ve sosyal boyutları arasındaki dengeyi uzun vadeli ve küresel bir perspektifle optimal hale getirmeyi amaçlayan strateji ve politikalar şeklinde tanımlanmaktadır (Pirdal, 2023). Birleşmiş Milletler (BM) ise sürdürülebilirliği; adaletsizlik, eşitsizlik, savaş, iklim değişikliği, kirlilik ve çevresel bozulma gibi küresel sorunları ele alan ve

gelecek nesiller de dahil olmak üzere herkes için daha iyi ve daha sürdürülebilir refah sağlamayı amaçlayan bir hareket olarak ifade etmektedir (Ghobakhloo, 2020). Holden ve diğerlerine göre (2017: 216) insan ihtiyaçlarını karşılamak, çevresel sınırlara saygı göstermek, sosyal eşitliği sağlamak sürdürülebilir kalkınmanın ahlaki gereklilikleridir.

Ekonomik kalkınmanın çevresel kısıtları sonucunda ekolojik sistem ile sürekli kalkınma arasında dengenin sağlanması gerekmektedir. Sürdürülebilir kalkınma anlayışındaki kalkınma kavramının niceliksel gelişme yanında niteliksel gelişmeyi de kapsadığı unutulmamalıdır. Bu kapsamda mal ve hizmet miktarındaki artışın yanı sıra mal ve hizmetlerin yüksek standardını, temiz ve sağlıklı bir çevreyi, para ile ölçülemeyen her türlü yaşam kalitesini artırıcı unsur göz önünde bulundurulmalıdır (İnançlı, 2018: 66).

Ekonomik büyümenin, sürdürülebilir kalkınmanın temel boyutlarından biri olduğu çoğunlukla dile getirilmektedir. Bu çerçevede ekonomik büyüme; sosyal refahı artırarak, insan ihtiyaçlarının karşılanmasına imkân sunarak ve yoksulluğu azaltarak sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunmaktadır. Diğer taraftan ekonomik büyümenin yarattığı gelir ve servet eşitsizliği, sosyal refah üzerinde olumsuz etkiye neden olmaktadır. Ekonomik büyüme, sera gazlarını azaltmada ve iklim değişikliğine uyum sağlamada sunduğu temiz teknolojiler aracılığıyla sürdürülebilir kalkınmaya katkı sunmaktadır. Öte yandan ekonomik büyüme, sera gazı emisyonlarını artırarak ve doğal kaynakların aşırı kullanılmasına yol açarak sürdürülebilir kalkınma üzerinde olumsuz etkiye neden olmaktadır. Bu kapsamda ekonomik büyüme, ne doğası gereği sürdürülebilir ne de doğası gereği sürdürülemezdir. Çözümün bir parçası olabilir ya da soruna katkıda bulunabilir ya da her iki açıdan etkide bulunabilir. Ekonomik büyümenin sürdürülebilirlikle ilişkisi politikalara, yasalara, yönetmeliklere ve mevcut kurumlara bağlı (Holden vd., 2017: 216) olarak değişiklik göstermektedir.

2.1. Sürdürülebilirlik İhtiyacı

Sürdürülebilirliğin öneminin daha iyi anlaşılmasıyla birlikte sosyal, çevresel ve ekonomik refah arasındaki güçlü ve karşılıklı etkileşime yapılan vurgu giderek artmaktadır. Literatürdeki araştırmalarda her üç refah göstergesi arasındaki denge ve uyumun gözetilmesinin gerekliliği dile getirilmektedir (Bakshi ve Paulson 2022; Gupta vd., 2021; Lupi vd., 2022). Bu çerçevede iktisadi refahın belirleyicisi olan endüstriyel uygulamaların sürdürülebilir kılınmasına yönelik çaba ve girişimler ön plana çıkmaktadır.

Üretim gibi ekonomik faaliyetler, doğal kaynaklar ve çevreden gelen hizmetler olmadan yürütülememektedir. Ayrıca ekonomik faaliyetler hükümet, eğitim kurumları vb. gibi toplumsal sistemlere de ihtiyaç duymaktadır. Toplum doğadan gelen mal ve hizmetlere sahiptir. Çevre ise kendi kendini idame ettirebilmekte ve topluma ya da ekonomiye ihtiyaç duymamaktadır. Dolayısıyla, ekolojik elverişlilik (ecologic viability) sürdürülebilirlik için temel ve en önemli gerekliliktir. Bunu sosyal arzu edilebilirlik ve son olarak da ekonomik uygulanabilirlik takip etmektedir. Bakshi ve Paulson (2022: 2450-2451) çalışmalarında, sürdürülebilirliğin koşullarını dört madde olarak sıralamıştır. Bu kapsamda ilk koşul, sürdürülebilir ürünlerin ve süreçlerin mevcut ve gelecek nesiller için ekonomik olarak uygulanabilir, sosyal olarak arzu edilir ve ekolojik olarak elverişli olmasıdır. Bu koşula genellikle "nesilleri tatmin etme ihtiyacı" adı verilmektedir. Bu kapsamda iktisadi, sosyal ve çevresel ihtiyaçlar karşılanmalıdır. Sürdürülebilirlikle ilişkili bir diğer koşul, insan faaliyetlerinin doğanın taşıma kapasitesini aşmadan gerçekleştirilmesidir. Üçüncüsü, sürdürülebilir sistemlerin tasarlanmasında ve değerlendirilmesinde kullanılan yöntemlerin mekân, zaman ve disiplinlerarası etkilerindeki kaymaların dikkate alınması ihtiyacıdır. Dolayısıyla çevresel sorunların bugünden geleceğe, mekâna ve disipline göre değişen doğası, sürdürülebilirliği sağlayacak söz konusu yöntemlerin gerekliliğine işaret etmektedir. Örneğin, elektrikli arabaların yaygınlaşmasıyla arabalardan çıkan egzoz emisyonları doğrudan ortadan kalksa da bahsi geçen emisyonlar elektrikli arabaların çalışması için gerekli olan elektriğin üretiminde ve ömrü dolan bataryaların geri dönüştürülmesinde tekrardan ortaya çıkmaktadır. Aynı durum fotovoltaiik paneller için de geçerlidir. Bahsi geçen panellerin sera gazı emisyonlarını azaltmasına karşın ömrü dolan panellerin birikmesi çevresel sorunlara neden olabilmektedir (Bakshi ve Paulson, 2022).

İklim krizi nedeniyle sürdürülebilirlik birçok organizasyon için birincil odak haline gelmiştir. Sürdürülebilirlik, iş başarısının sadece kârlar ve yatırım getirisi gibi finansal terimlerle sağlanamayacağını aynı zamanda çevresel ve sosyal boyutlarında dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Yong vd., 2020: 216).

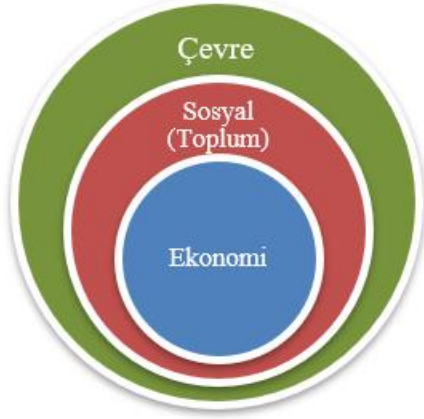
Kumar ve diğerlerine göre (2021), günümüzün iş ortamı değişken, karmaşık ve muğlaktır. Bu koşullar altında üreticilerin ayakta kalabilmeleri için ürünlerini üretirken ve müşterilerine ulaştırırken sürdürülebilirliği sağlamaları gerekmektedir (Kumar vd., 2022: 453). Geçmiş sanayi devrimleri sırasında firmalar, çevresel sürdürülebilirliği tamamen göz ardı ederek yalnızca ekonomik kazanç ya da fayda elde etmekle ilgilenmiştir (Ramirez-Penãa vd., 2020). Ayrıca, Bag ve diğerlerine göre (2021) önceki sanayi devrimleri, ürünlerin üretilmesinde ve müşterilere ulaştırılmasında sürdürülebilirliğin sosyal ve çevresel boyutlarını dikkate almamışlardır. Günümüzde ise üreticiler, sıkı çevre düzenlemelerine uyma konusunda daha fazla sorumluluk üstlenmek zorunda kalmaktadır. Şirketler hem ekonomik kazanç sağlamak hem de sürdürülebilirliğin çevresel ve sosyal boyutlarına katkı sağlamak amacıyla ekolojik inovasyonlara yönelmektedir. Görüldüğü üzere şirketler yalnızca müşterilerin özelleştirilmiş ürünlere yönelik artan ihtiyaçlarını karşılamakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel olarak sürdürülebilir ve ekonomik olarak verimli ürünlere yönelik sürekli artan talepleri de karşılamak zorundadır (Kumar vd., 2022: 454). Çünkü tüketiciler üretimin olumsuz çevresel ve sosyal etkileri konusunda daha bilinçli hale gelmektedir. Bu farkındalık, bireyleri çevre dostu malzemeler ve üretim süreçleri kullanılarak üretilen ürünleri araştırmaya teşvik etmektedir. Üreticilerin, Sürdürülebilirlik 4.0 teknolojilerini benimsemesiyle üretim sistemleri daha yeşil hale gelmektedir. Aynı zamanda üreticiler rekabet avantajlarını korurken, tüketicilerin çeşitli ihtiyaçlarını da karşılamaktadırlar (Javaid, 2022: 83). Diğer taraftan çevreyi gözetererek ürün talebinde bulunan tüketicilerin nispi büyüklüğü çevre dostu ürünlerin piyasa payı üzerinde etkili olmaktadır.

3. Sanayi 4.0 ve Sürdürülebilirliğin Üç Boyutu: Triple-Bottom-Line Yaklaşımı

Sanayi 4.0'ın sürdürülebilirliğin sağlanması sürecine potansiyel katkıları bulunmaktadır. Sanayi 4.0'ın sürdürülebilirlik üzerindeki faydalarının aşağıdaki belirtilen alanlarda gerçekleşmesi beklenmektedir (Machado vd., 2020):

- Üretkenliği ve esnekliği artırma;
- Kaynak verimliliğini geliştirme; atıkların, enerji tüketiminin ve aşırı üretimin azaltılması (örneğin, yenilenebilir enerji fazlasının diğer tesislerle paylaşılması);
- Paydaşların katılımı/işbirliği (örneğin; makine, bilgi sistemleri, ürünler ve insanları bir ağda birleştiren kapalı döngü üretim sistemleri);
- Bilgi İletişim Teknolojileri (BİT) yetenekleri ile ilgili iş fırsatları; rutin işleri azaltarak çalışma ortamının kalitesinin artırılması (örneğin, engelli ve yaşlı çalışanlar için istihdam fırsatları oluşturma).

Sanayi 4.0 ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişki vurgulanırken birçok çalışmada sürdürülebilirliğin üç ana boyutunu dikkate alan Triple-bottom-line (3BL, TBL) yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşıma göre sürdürülebilirliğin sosyal (toplum), çevresel ve ekonomik olmak üzere üç farklı boyutu bulunmaktadır. Bu boyutların iç içeliği Şekil 1'de gösterilmektedir. Küresel ölçekte imalat sektörünün sürdürülebilirliğinin sağlanması için bu üç boyutun dikkate alınması gerekmektedir (De Alwis vd., 2023). Çünkü kurumsal açıdan bakıldığında, bir şirketin uzun vadeli başarısı sürdürülebilirliğin üç boyutuna da bağlıdır (Beltrami vd., 2021).



Şekil 1. Sürdürülebilirliğin Üç Boyutu.

Şekil, yazarlar tarafından Bakshi ve Paulson (2022: 2450) çalışmasına dayalı olarak oluşturulmuştur.

Bu yaklaşım, organizasyonların ve işletmelerin performansının sadece finansal kârlılık açısından değil, aynı zamanda sosyal ve çevresel etkiler açısından da değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Machado ve diğerleri (2020), TBL'nin üç boyutunu şöyle ifade etmektedir: İlki, iktisadi faydayı arttırmak için daha yüksek yatırım getirisi olan bir ürün üretmektir. İkincisi, çevresel bozulmanın etkilerini azaltmak amacıyla çevre dostu ürünler üretmektir. Üçüncüsü ise inovasyon, öğrenme ve işbirliği kültürünü teşvik etmek için çalışanlar arasında yaratıcı bir çalışma ortamı geliştirmektir (Kumar vd., 2022: 453-454).

Varela ve diğerlerinin (2019), çalışmasının bulguları, "sanayi şirketlerinin ekonomik, çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik algıları Sanayi 4.0 kavramıyla pozitif ilişkilidir." hipotezini doğrulamaktadır. Sanayi 4.0'ın sürdürülebilirliğin üç boyutu açısından sağladığı avantaj ve dezavantajlar, Tablo 2'de gösterilmektedir. Tablo 2'de görüldüğü gibi çevresel, sosyal ve ekonomik boyutların her biri sürdürülebilirlik açısından sağladığı avantaj ve dezavantajlarla ayrı ayrı incelenmeye değerdir. Bu doğrultuda çalışmanın devamında boyutların her biri ayrı ayrı ele alınmaktadır.

Tablo 2. Sanayi 4.0'ın Sürdürülebilirlik Açısından Sağladığı Avantaj ve Dezavantajlar

Çevresel	Sosyal (Toplum)	Ekonomik
3D baskı	Nitelikli işgücü ihtiyacı	Küresel ekonomide artan akıllı sistemler
Biyo-enerji kullanımı	İşsizlikte artış	Dijital dönüşüm
Verimlilik artışı	Dezavantajlı kesimlerin istihdamında artış	Artan yatırımlar
Azalan hammadde kullanımı	Azalan çalışma süreleri	Stratejik uyum sağlama yeteneği
Atık ve CO2 Emisyonlarında azalma	Küresel ölçekte endüstri göçleri	Rekabet gücünde artış
Azalan enerji ve kaynak tüketimi	Yeni meslekler	Hızlı ekonomik büyüme
Yenilenebilir enerji kullanımında artış	GIG ekonomisi, sendikaların zayıflaması	Yüksek üretkenlik
Karbon ayak izinde azalma	İş kazalarında azalış	Azalan işgücü ve malzeme maliyetleri
Sürdürülebilir inşaat	Artan psikolojik stres	Azaltılmış malzeme kurulum süreleri
	Çalışma koşullarında iyileşme	Malzeme akışının optimize edilmesi
	Karar alma süreçlerine çalışanların katılımını artırmak	Verimlilikte artış
	Adil çalışma koşulları	Yeni iş modelleri
	Gelir dağılımının bozulması	Ürün kalitesinde artış
		Üretim kapasitesindeki artış

Kaynak: Bai vd. (2020), Ching vd. (2022), Cochran ve Rauch (2020), Gabriel ve Pessl (2016), Ghobakhloo (2020), Javaid vd. (2022), Maqbool vd. (2023), Rahardjo vd. (2023), Sartal vd. (2020), Siltori vd. (2021), Toker (2018), Varela vd. (2019). Tablo yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

3.1. Sosyal Sürdürülebilirlik

Sosyal sürdürülebilirlik, sürdürülebilirlikte insanı odağına almaktadır. Bu boyutta bireylerin kendi yaşamlarına yön verebilecek fırsat ve seçeneklere sahip olabilmemesine neden olan eğitim, sağlık, gelir dağılımı dikkate alınmaktadır.

Sosyal sürdürülebilirlik; işletmelerin, çevrenin, ekonominin ve teknolojinin insanlar üzerindeki olumlu ve olumsuz etkilerini tanıma ve yönetme sürecidir (Ghobakhloo, 2020). Yaşanan dijital dönüşüm sonucunda el becerilerine dayanan bazı mesleklerin ortadan kalkması ve bu mesleklerde istihdam edilen nitelsiz çalışanların işsiz kalması beklenmektedir. Diğer taraftan nitelik düzeyi yüksek mesleklerde nitelikli işgücü açığı ortaya çıkabilecektir. Akıllı ve otonom üretim sistemlerinin, monoton, tekrarlayan ve riskli görevleri devralarak iş sağlığı ve güvenliğinin artmasına neden olması, iş kazalarının azalmasına imkân sağlayacak ve yüksek çalışan memnuniyeti ve motivasyonuna yol açabilecektir (Bai vd., 2020; Cochran ve Rauch, 2020; Rahardjo vd., 2023; Siltori vd., 2021). Ürünlerde ve üretim ekipmanlarında bulunan büyük sayıdaki sensörler, insanlar için zararlı durumların tespitine imkân sağlayarak, fiziksel ve bilişsel ergonomiye katkı sağlayabilecektir (Siltori vd., 2021). Ayrıca fiziksel ve zihinsel iş yükünün ve stresin azaltılması konusunda yardımcı olabilecektir (Cochran ve Rauch, 2020). Dijital dönüşümle birlikte popüler olan esnek çalışma biçimlerinin egemen olmasıyla çalışanların fiziki varlığına ihtiyaç duyulmaması, iş ile özel hayatı birleştirerek, çalışanların aileleriyle daha fazla vakit geçirebilmelerine imkân sağlayabilecektir (Cochran ve Rauch, 2020; Gabriel ve Pessl, 2016). Öte yandan esnek çalışma biçimleri, daha fazla mesai saatlerine yol açarak hem çalışan üzerindeki psikolojik stresi arttırabilecek hem de iş-özel hayat dengesini bozabilecektir. İnsanlar ve makineler arasındaki etkileşimin artmasıyla beraber olarak çalışanlar arasındaki iletişim ve işbirliğinin azalması veya iş dağılımının artık amirden değil, teknik bir sistemden kaynaklanması duygusal strese yol açabilecektir (Gabriel ve Pessl, 2016). Ayrıca dijital teknolojiler, iş hayatında adil çalışma koşullarının (çocuk işçi çalıştırılmaması vs.) sağlanmasına yardımcı olabilecektir (Cochran ve Rauch, 2020). Sanayi 4.0 teknolojilerinin benimsenmesiyle ses tanıma ve sanal gerçekliğin yaygınlaşması dezavantajlı bireylere (görme engelliler vs.) işgücü piyasasında daha büyük fırsatlar sunabilecektir (Siltori vd., 2021). Günümüzde mühendisler, çalışma sürelerinin %31'ini değer üretici faaliyetler yerine bilgi aramak için harcamaktadır (Stăncioiu, 2017). Dijital dönüşüm sürecinde büyük veriyi analiz edebilen Yapay Zeka (AI)'lar sayesinde iş yerlerinde daha az fakat daha etkin çalışma biçimleri meydana gelecek ve bundan kaynaklı olarak çalışma sürelerinde azalma ortaya çıkabilecektir. Yeni ekonomik yapı içerisinde, işverenler, işçilere verdikleri maaş, sosyal güvenlik primleri ve kıdem tazminatı gibi giderleri robotlara ödemeyeceklerinden ve gelirin büyük kısmının işverenlerde kalmasından dolayı toplumda gelir eşitsizliğinin artacağı öngörülmektedir (Toker, 2018). Aynı zamanda esnek çalışmanın temel alındığı ve işverenle çalışan arasındaki ilişkinin muğlak olduğu bir ekonomi modeli olarak bilinen GIG ekonomisi, sendikaların zayıflamasına ve iş güvencesinin ortadan kalkmasına neden olabilecektir (Alemdar, 2021; Toker, 2018). Çünkü bahsi geçen modelde her bir çalışan şirketin çalışanı olmaktan öte, şirket adını ve platformunu kullanan bağımsız bir taşeron olmaktadır (Alemdar, 2021).

3.2. Çevresel Sürdürülebilirlik

Çevresel sürdürülebilirlik, temel olarak çevresel sistemlerinin dengesi, doğal kaynakların tüketimi ve yenilenmesi, ekolojik bütünlük ile ilgilidir (Ghobakhloo, 2020). Zira çevrenin korunması, sürdürülebilir üretimin sağlanmasında kritik role sahiptir.

Çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması için kullanılan temel Sanayi 4.0 araçları, nesnelerin interneti (IoT), veri tabanlı bulut hesaplama, Sanayi 4.0'in farklı prensipleri, ürün ve süreçle ilgili yönler vb. olarak ifade edilmektedir. Çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için kullanılan Sanayi 4.0 araçları Şekil 2'de gösterilmektedir. Bahsedilen Sanayi 4.0 araçlarıyla ve stratejik düzenlemelerle, çevresel sürdürülebilirliğin geliştirilmesi başarılabilecektir (Javaid vd., 2022).



Şekil 2. Sürdürülebilirliği Sağlayabilmek için Kullanılan Sanayi 4.0 Araçları (Kaynak: Javaid vd. (2022). Şekil yazarlar tarafından Türkçeleştirilmiştir.

Çevresel açıdan bakıldığında, Sanayi 4.0 teknolojilerinin veri analizi aracılığıyla enerji ve kaynak tüketiminin azaltılmasına katkı sağlayabileceği görülmektedir (Bai vd., 2020). Veri odaklı ve izlenebilir karbon ayak izi analizleri aracılığıyla atık veya CO2 emisyonlarında azalma meydana gelebilecektir (Bai vd., 2020; Gabriel ve Pessl, 2016). Ayrıca 3D baskı, Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IIoT) ve AI tabanlı üretimin yaygınlaşmasıyla atıkların azalması ve her ürün başına karbon emisyon indeksinin düşmesi beklenmektedir (Cochran ve Rauch, 2020; Ghobakhloo, 2020). IIoT, AI, robotik ve kobotik tabanlı üretim, üretimin verimliliğinin ve esnekliğinin artmasına imkân sağlayabilecektir (Bai vd., 2020; Ghobakhloo, 2020). Akıllı fabrikalar ve robotik sistemler vasıtasıyla seri üretimden kişiselleştirilmiş üretime geçiş, gereksiz üretimi azaltarak, düşük karbonlu üretime katkıda bulunabilecektir (Ghobakhloo, 2020; Siltori vd., 2021). Daha fazla şirket üretim süreçlerini daha çevre dostu ve sürdürülebilir olacak şekilde dönüştürdükçe, Sanayi 4.0 yarının akıllı fabrikalarında yaygınlaşacaktır (Javaid vd., 2022). Bu bağlamda sürdürülebilir akıllı fabrikalar, sürdürülebilirlik üzerinde önemli rol oynayabilecektir.

Sanayi 4.0'la birlikte başlayan dijital dönüşüm, sürdürülebilir enerji ve kaynakların kullanımı vasıtasıyla çevresel sürdürülebilirliği destekleyebilecektir. Enerji sistemlerinin sayısallaştırılması ve kablosuz ağlar ve blockchain gibi teknolojileri içine alan dijital ve işletme teknolojilerinin yaygın olarak uygulanması, enerji sektörünün ilerlemesi için değerli fırsatlar sunmuştur. Güç şebekelerinin ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştıran akıllı şebekeler, literatürde yaygın olarak kabul edilen sayısallaştırma uygulamalarının bir örneğidir (Ghobakhloo, 2020).

Çevre dostu üretim modeli olarak bilinen 3D baskı, Artırılmış ve Sanal Gerçeklik ve Yüksek Performanslı Hesaplama Destekli Tasarım ve Üretim gibi yeni çevre dostu hizmetlerin geliştirilmesini kolaylaştırmaktadır (Gabriel ve Pessl, 2016; Ghobakhloo, 2020). Ayrıca 3D baskı, benzersiz ve küçük parçaların (örneğin prototipler, yedek parçalar veya son derece özel ürünler) üretimi için özellikle uygundur (Gabriel ve Pessl, 2016). Bunun yanı sıra 3D baskının gelişmesiyle birlikte fabrikaların ham maddelerin veya piyasanın bulunduğu merkezlere yakın yerlerde daha kolay kurulabilmesi lojistik maliyetlerin azalmasına neden olabilecek ve çevresel sürdürülebilirliği katkı sağlayabilecektir (Cochran ve Rauch, 2020).

IoT, gerçek zamanlı bağlantı, akıllı sensörler ve simülasyon gibi teknolojiler, gelecekte enerji tüketiminin izlenmesine ve tahmin edilmesine ve dolayısıyla bununla ilişkin olarak daha verimli enerji üretimine katkı sağlayabilecektir. Ayrıca, Büyük Veri Analitiği, IoT ve dijitalleştirilmiş sürdürülebilirlik performans göstergeleri çevresel sürdürülebilirliğin ölçülmesine ve sürdürülebilirlik kıyaslaması yapılmasına olanak

tanyabilecektir. Dijital cihazlar ve görselleştirme teknolojileri ise işletmelerdeki kağıt kullanımının en aza indirilmesini sağlayabilecektir (Cochran ve Rauch, 2020).

Sanayi 4.0 teknolojileri çevre dostu bir inşaat sektörünün gelişiminde de önemli rol oynamaktadır. Özellikle çevre dostu inşaat, küresel toplumun uzun vadeli büyümesi için kritik bir öneme sahiptir. Yeşil binalar, sadece kullanım sırasında daha az enerji tüketen değil, aynı zamanda mümkün olan en az enerji ile inşa edilen binalardır. IoT, sürdürülebilir inşaatta gerçek zamanlı enerji kullanımına yönelik veri toplama sürecinde önemli rol oynayabilecektir (Maqbool vd., 2023). Sensörler ve IoT cihazları, insanlar binadan çıktıklarında ışık ve klimalarını kapatmalarını söyleyebilmelerine imkân sağlayabilecektir (Javaid vd., 2022). Beton karıştırma, yapı blokları ve işgücü gibi bazı geleneksel mekanizmaların görevleri, 3D baskı teknolojisi ile yerine getirilebilecektir (Maqbool vd., 2023).

3.3. Ekonomik Sürdürülebilirlik

Ekonomik sürdürülebilirlik, çevresel ve sosyal kaynaklar korunurken uzun vadeli ekonomik büyümenin sağlanması olarak ifade edilmektedir. Bu açıdan bakıldığında, ekonomik sermayenin büyümesi, doğal veya sosyal sermayenin azalması pahasına olmamalıdır. Bu nedenle ekonomik büyüme, doğal kaynaklar, ekosistemler, sosyal refah ve servet dağılımındaki dengeyi göz ardı etmemelidir (Ghobakhloo, 2020). Ekonomik perspektiften bakıldığında; IoT, hassas tarım alanındaki GPS, toprak sensörleri ve hava durumu gibi diğer teknolojilerle birlikte kullanıldığında veri ve analitiği, mahsul bilimiyle entegre ederek bilimsel tarım kararlarının alınmasını mümkün kılabilir. Bu, gübreleme, sulama, hasat zamanı ve tohum aralığı gibi alanlarda kaynak kullanımının optimizasyonunu destekleyebilecektir (Bai vd., 2020). Daha verimli üretim sistemleri ve ileri dijital üretim teknolojilerinin ortaya çıkışı akıllı malzeme planlama ve tahsis sistemleri veya akıllı malzemeler, malzeme verimliliğine ve tasarrufuna önemli ölçüde katkıda bulunmuştur (Ghobakhloo, 2020).

Sürdürülebilirliğin üç boyutunu da etkileyen enerji, sürdürülebilirliğe ulaşmak için kritik öneme sahiptir. Sanayi 4.0 teknolojilerine geçiş üretim sürecindeki enerji talebinin ve sera gazı emisyonlarının azalmasına neden olabilecektir. Sanayi 4.0 teknolojilerinin (otomasyon, mobilite, IoT, Siber Fiziksel Sistemler ve Büyük Veri Analitiği) tek başına ve bir arada uygulanmasının etkilerini karşılaştırmalı olarak analiz eden Süreç Odaklı Enerji (Process Centric Energy) modelinin sonuçları, Sanayi 4.0'ın sürdürülebilirliğe katkı sunabileceğini doğrulamaktadır (Munsamy ve Telukdarie, 2018). IoT teknolojisi kullanan, akıllı şehirler yaşam kalitesini artırmayı hedeflerken aynı zamanda enerji tüketimini azaltmayı da amaçlamaktadır (Javaid vd., 2022). Ayrıca, Sanayi 4.0 teknolojilerinin benimsenmesiyle birlikte ekipmanlara entegre edilen yeni teknolojilerle enerji kaynaklarını daha etkin bir şekilde kullanmak mümkün olabilecektir (Siltori vd., 2021).

4. Sanayi 4.0'da Sürdürülebilir İmalat (Manufacturing): Sürdürülebilirlik 4.0

Sanayi 4.0 teknolojilerinin üretim süreçlerine uygulanmasıyla Lojistik 4.0³, Sürdürülebilirlik 4.0 gibi kavramlar literatürde kullanılmaya başlanmıştır. Üretimi merkeze alan Sanayi 4.0'da üretimin sürdürülebilirliği kilit unsur olarak kabul edilmektedir. Her bir Sanayi 4.0 teknolojisinin, bütünsel entegrasyonlarının (yatay, dikey ve uçtan uca dijital) üretim sistemlerinin rekabet edebilirlik ve sürdürülebilirlik sağlamasına olanak tanıyacak şekilde çalışması beklenmektedir. Bu nedenle, birçok araştırmacı, üretim ve tedarik zincirinde sürdürülebilirliğin faydalarından yararlanmak için Sanayi 4.0'ın sunduğu olanakları araştırmaya başlamıştır. Diğer taraftan az sayıda araştırmacı ise Sanayi 4.0'ın ürün ve hizmetleri üretirken kuruluşun sürdürülebilirliğini tahrip edeceğini ifade etmektedir Tseng ve diğerlerine (2018) göre Sanayi 4.0 teknolojilerini kullanmanın büyük miktarda kaynak ve enerji gerektirmesi küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çeşitli olumsuz çevresel etkilere yol açabilecektir (Kumar vd., 2022: 456). Luthra ve Mangla'ya (2018: 168) göre hızlı sanayileşme çalışanların sağlığı ve güvenliğini olumsuz yönde etkileyebilecektir. Bu nedenle, endüstriyel üretim sistemlerinin modern teknolojileri kullanırken çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan dengeli olması gerekmektedir.

³ Daha ayrıntılı bilgi için bkz. Rojko (2017); Özdemir & Özgüner (2018)

Öte yandan araştırmacıların çoğunluğu Sanayi 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirliği olumlu yönde etkileyeceğini sıklıkla vurgulamaktadır. Ching ve diğerleri (2022: 13) çalışmalarında, Sanayi 4.0'ın birbiriyle son derece ilişkili 15 işlev aracılığıyla sürdürülebilir imalata katkıda bulunduğunu göstermiştir. Bu işlevler; iş modeli inovasyonu, müşteri odaklı üretim, çalışan verimliliği, zararlı emisyon azaltımı, iyileştirilmiş üretim kar marjı (improved manufacturing profit margin), akıllı üretim planlama ve kontrol, üretim çevikliği, üretim verimliliği ve etkinliği, yeni istihdam olanakları, kaynak ve enerji verimliliği, düşük üretim maliyetleri, güvenli ve akıllı çalışma ortamı, tedarik zinciri süreç entegrasyonu, sürdürülebilir ürün geliştirme ve sürdürülebilir değer yaratma ağıdır. Söz konusu çalışmada sürdürülebilir üretimin yol haritası geliştirilmiş ve her bir sürdürülebilirlik fonksiyonunun rolü açıklanmıştır. Luthra ve Mangla'ya (2018) göre Sanayi 4.0 araçları, yeşil ürünler geliştirmek, yeşil üretim operasyonları ve süreçler gibi yollarla gelişmekte olan ekonomilerde tedarik zincirinin sürdürülebilirliğini sağlama potansiyeline sahiptir. Bu potansiyel gelişmekte olan ülkelerin politika yapımcılarının Sanayi 4.0 girişimlerini derinlemesine anlamasını, çevresel sürdürülebilirliği sağlamasını, insan ve toplum refahını, ekonomik kazançları artırmasını sağlayabilecektir (Luthra ve Mangla, 2018).

Birçok çalışmada, Sanayi 4.0 teknolojilerinin ilkelerinin ve amaçlarının sadece geleneksel kurumsal iş ve ekonomik performansın artırılması ile sınırlı olmadığı, aynı zamanda daha sürdürülebilir bir topluma katkı sağlayacağı vurgulanmaktadır. Yeşil, verimli ve dağıtılmış üretim (distributed manufacturing)⁴ gibi süreç yenilikleri, modern bilgi teknolojileri temelli Sanayi 4.0 girişimleri ile birleştirildiğinde, endüstriyel tedarik zincirlerinde sürdürülebilir bir kültüre yol açmaktadır (Luthra ve Mangla, 2018: 169). Sürdürülebilirlik ve Sanayi 4.0 arasındaki ilişkiden girişimciler sermaye yatırım kararlarını verirken, politika yapımcılar ise politikalarını oluştururken faydalanabileceklerdir (Bai vd., 2020: 2). Bu gelişmelerle ilişkili olarak sürdürülebilir imalat (üretim) diğer bir tanımlamayla Sürdürülebilirlik 4.0 kavramı tartışmaların öznesi haline gelmiştir. Javaid ve diğerlerine göre (2022) Sürdürülebilirlik 4.0, sanayinin dördüncü dalgası olan Sanayi 4.0'a dayanmaktadır. Bu devrim nesnelere interneti, gelişmiş üretim ve akıllı dijital ortam gibi fiziksel ve dijital dünyaları birleştiren yeni teknolojilerle karakterize edilmektedir. Sürdürülebilirlik 4.0, sürdürülebilirliğin toplumsal bir felsefe olarak ilerlemesi, sosyal, ekolojik ve etik konuların çerçevelenmesinde daha baskın bir tutum haline gelmesinin bir ifadesidir. Sürdürülebilirlik 4.0, dijital teknolojinin bir organizasyonun tüm yönlerine dahil edilmesini gerektirmektedir (Javaid vd., 2020). Machado ve diğerlerine göre (2020: 1464) Sürdürülebilirlik 4.0, yüksek kaliteli ürünleri ve hizmetleri daha az ve daha sürdürülebilir kaynaklar (enerji ve malzemeler) kullanarak üretebilen, çalışanlar, müşteriler ve çevresindeki topluluklar için daha güvenli olan ve tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel ve sosyal etkileri hafifletebilen süreçlerin ve sistemlerin entegrasyonu olarak tanımlanmaktadır. Shah ve diğerleri (2020) ise Sürdürülebilirlik 4.0'ı, hammaddelerin çevresel yöntem ve süreçlerle son ürünlere dönüştürülmesi olarak tanımlamaktadır. Sürdürülebilir üretim, sürdürülebilir değer yaratmak ve ekonomik büyümeyi mümkün kılmak için üretimin üç ayrılmaz unsurunu (ürünler, süreçler ve sistemler) kapsamaktadır (Enyoghasi ve Badurdeen, 2021: 1). Garretson ve diğerlerine göre (2016: 991) ise Sürdürülebilirlik 4.0, mal veya hizmetlerin oluşturulması, üretimin olumlu etkilerini artırmak veya olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla sorumlu ve bilinçli eylemlerle gerçekleştirilen bir süreç sistemini kullanarak ekonomik, çevresel ve sosyal yönleri eş zamanlı olarak ele almaya çalışan bir işlemdir. Sürdürülebilir üretim, ekonomik açıdan sağlam değer yaratma süreçleri aracılığıyla imal edilen ürünleri üretmek için kullanılan teknikler, stratejiler ve faaliyetlerin bir sistemi olarak tanımlanmakta ve olumsuz çevresel etkiyi en aza indirmeyi, enerji ve doğal kaynakları korumayı ve çalışanlar, tüketiciler ve toplulukların refahını ve güvenliğini artırmayı amaçlamaktadır (Ching vd., 2022: 2).

Sürdürülebilirlik binlerce şirketin gündemine girdikçe, İnsan Kaynaklarının (İK) işletmelerin sürdürülebilirliğe uyum süreçlerini desteklemek için gereken yetkinlikleri, işbirliği stratejilerini ve organizasyonel yetenekleri geliştirmeleri önemli bir hedef olarak ön plana çıkmıştır (Wirtenberg vd., 2007). Sürdürülebilirlik 4.0'ın yaygınlaşması şirketlerin İK'larının yeşillenmesine yol açmış ve literatürde Yeşil

⁴ Dağıtılmış üretim veya merkezi olmayan üretim olarak bilinen distributed manufacturing, ürünlerin üretim ve montajının tek bir fabrikada veya yerde değil, çeşitli yerlerde veya tesislerde gerçekleştirildiği bir üretim modelini ifade etmektedir.

İnsan Kaynakları Yönetimi (YİKY) yoğun şekilde tartışılmaya başlanmıştır. YİKY, geleneksel insan kaynakları yönetimi uygulamalarının şirketlerin çevresel hedefleriyle sistematik ve planlı bir şekilde uyumlu hale getirilmesi olarak tanımlanmaktadır (Jabbour, 2013: 147-148). Çalışanları şirketin çevresel stratejisiyle uyumlu hale getiren bütüncül bir bakış açısına sahip olarak kabul edilen YİKY, yeşil yönetim, yeşil pazarlama ve yeşil tedarik zinciri gibi departmanlara katkıda bulunmasından dolayı şirketler açısından oldukça önemlidir (Yong vd., 2020). Ayrıca bireyler alışveriş yaparken nasıl yeşil ürünlere yöneliyorlarsa aynı şekilde, iş tercihinde şirketlerin çevresel (yeşil) imajına dikkat etmeye başlamışlardır. Guerci ve diğerlerinin (2016) aktardığı gibi, İtalya ekonomisinin uzun yıllardır büyük bir durgunluk içinde olmasına rağmen, potansiyel iş başvuru sahipleri kariyer seçimlerinde hala yeşille ilgili konulara değer vermektedirler. Bundan kaynaklı olarak firmalar, yeşil bir işveren olarak ün kazanmanın potansiyel yetenekleri çekmek için etkili bir yol olduğunu fark etmeye başlamışlardır (Ahmad, 2015; Yong vd., 2020). Siemens, BASF, Bayer ve Mannesmann gibi Alman firmaları, yüksek kalitede personel çekmek için çevresel faaliyetleri ve yeşil imajı kullanmaktadır (Ahmad, 2015: 5). YİKY politikaları eğitim programları vasıtasıyla çalışanların kişisel ve çevresel yeterliliklerini artırmaya çalışmaktadır. Bu açıdan yeşil eğitim olarak da bilinen çevresel eğitim YİKY politikalarında önemli rol oynamaktadır. Wehrmeyer'in (1996) de ifade ettiği üzere, bir şirketin çevreci bir yaklaşım benimsemesinde karşılaşılabilecek başarı ve başarısızlığın temel anahtarının çalışanlar olması bunun en önemli nedenidir (Muster ve Schrader, 2011: 142). Sammalisto ve Brorson'a (2008: 300) göre eğitimin iki amacı bulunmaktadır: (a) insanlara şirket politikaları ve günlük prosedürler hakkında bilgi vermek; (b) bireylerin tutumunu değiştirmek ve çevresel konularla ilgili artan farkındalık yaratmak. Yeşil eğitim, bazı ülkelerde yaygınlaşmış durumdadır. Örneğin, Birleşik Krallık'ta bir CIPD/KPMG anketi, organizasyonların %42'sinin çalışanları çevre dostu iş uygulamalarında eğittiğini bildirmektedir (Phillips'den Aktaran Yong vd., 2020: 215). YİKY uygulamalarının benimsenmesinin getirdiği faydalar literatürdeki çeşitli çalışmalarda incelenmiş ve maliyet azaltma, yetenek çekme ve elde tutma gibi faydalarının olduğu saptanmıştır. Yong ve diğerlerinin (2020: 224) bulguları, YİKY (yeşil işe alım ve yeşil eğitim)'nin Malezya'nın imalat endüstrisinde sürdürülebilirliğe yol açacağını ortaya koymaktadır. Masri ve Jaaron (2017) Filistin'deki imalat firmalarında İK yöneticilerinden elde edilen saha verilerini kullanarak, yeşil işe alma ve seçme, yeşil eğitim ve geliştirme, yeşil performans yönetimi ve değerlendirme, yeşil ödül ve tazminat, yeşil çalışan yetkilendirme ve katılım ve yeşil organizasyonel kültürün yönetimi olmak üzere altı temel YİKY uygulaması saptamışlardır. Sonuçlar YİKY uygulamalarının toplam olarak orta düzeyde olduğunu göstermesine karşın analiz, altı YİKY uygulamasıyla çevresel performans arasında istatistiksel olarak olumlu ve anlamlı bir ilişkinin bulunduğunu göstermektedir. En etkili uygulama ise, yeşil işe alma ve seçmedir (Masri ve Jaaron, 2017: 23).

Sürdürülebilirlik 4.0'la birlikte imalat kavramına sürekli olarak yeni "R"lar eklenmeye devam etmektedir. Atık azaltmadan (R) sonra, eklenen 3R [Azalt (Reduce), Yeniden Kullan (Reuse) ve Geri Dönüştür (Recycle)] ile imalat yeşil imalata doğru ilerlemektedir. Ardından ise, Kurtarma (Recover), Yeniden Tasarım (Redesign) ve Yeniden Üretim (Remanufacture)'i içeren yeni R'ler eklenerek, imalat ve genel üretim daha sürdürülebilir hale gelmektedir (Javaid vd., 2022; Sartal vd. 2020; Shah vd., 2020).

Luthra ve Mangla (2018) geniş bir literatür taramasıyla Sanayi 4.0 tabanlı sürdürülebilirlik odaklı tedarik zincirlerine yönelik 18 temel zorluk belirlemişlerdir. Bu zorluklar anket vasıtasıyla Hindistan'ın imalat sektöründen alınan yanıtlar üzerinden analiz edilmiş ve dört tane zorluk saptanmıştır. Bu zorluklar sırasıyla şu şekildedir: Organizasyonel zorluklar, hukuki ve etik zorluklar stratejik zorluklar ve teknolojik zorluklar.

Sürdürülebilirlik 4.0; çevresel endişeler, daha sıkı yasal düzenlemeler, yüksek enerji maliyetleri ve çevre dostu ürünlere olan artan tüketici talepleri gibi çeşitli dışsal etkenler nedeniyle şirketler için bir gerekliliktir. Sonuç olarak, farklı üretim aşamalarının çevresel etkisini azaltmak için birçok çaba harcanmış ve enerji tüketimi, karbon emisyonları ve sera gazı emisyonları gibi değişkenleri izlemek ve kontrol etmek için bir dizi strateji uygulanmıştır (Heno-Hernández vd., 2019: 195).

Al-Zyadat ve diğerleri (2022), Ürdün'deki endüstriyel organizasyonlarda Sanayi 4.0'ın sürdürülebilirliğe olumlu etkisinin olduğu sonucuna ulaşmıştır. Bu sonuç sürdürülebilirlik ve dijitalleşme arasında güçlü bir ilişkinin olduğunu ifade eden Esses ve diğerlerinin (2021) sonuçlarıyla da uyumludur. Ching ve diğerlerinin

(2022) çalışmasının sonuçları da Sanayi 4.0'ın sürdürülebilir üretimde kolaylaştırıcı rol oynayabileceğini göstermektedir. De Alwis ve diğerlerinin (2023) çalışmasının bulgularından da görüldüğü üzere Sri Lanka'daki sanayi çalışanlarının Sanayi 4.0'ın sürdürülebilir üretim açısından sunabileceği fırsatlar konusundaki beklentileri oldukça yüksektir. Fakat Sanayi 4.0 teknolojilerinin uygulanmasının maliyetlerinin yüksek olması, işçilerde teknik beceri eksikliği ve BİT'e yönelik bilgi eksikliği, değişime direnç, tesislerdeki teknolojik makinelerin yetersizliği, iş kaybı korkusu, pratik zorluklar ve net yatırım getirisinin belirsizliği gibi nedenler dijital uygulamaların üretim sürecine uygulanması sürecinde zorluklar yaratmaktadır.

5. Sürdürülebilirlik 4.0'ın Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH)'ne Katkısı

Toplumlar; hızlı nüfus artışı, kaynak tükenmesi, çevresel kirlilik, arazi kıtlığı, artan gıda talebi ve atık yönetimi gibi nedenlerden dolayı sürdürülebilir kalkınmayı gerçekleştirme konusunda büyük endişe taşımaktadır. Çoğu çalışmada, Sanayi 4.0 ve dijital dönüşümün sürdürülebilir kalkınmayı sağlamada ve BM tarafından ortaya koyulan SKH'lere ulaşmada önemli rol oynayabileceği ifade edilmektedir (Al-Zyadat vd., 2022; Beltrami vd., 2021; Dantas vd., 2021; ElMassah ve Mohieldin, 2020). Bunun aksine bazı çalışmalar, Sanayi 4.0'ın sürdürülebilir kalkınma üzerindeki olumsuz etkilerine odaklanmaktadır (Beltrami vd., 2021).

Sanayi 4.0'ın SKH'lere ulaşılması sürecine önemli faydalar sağlayacağına dair beklentiler özellikle politika yapıcılar ve sanayi sektörü temsilcileri arasında oldukça yoğundur. Global e-Sustainability Initiative (GeSI), BİT şirketlerinin bir girişimi olarak, BİT'in 2030'a kadar CO2 emisyonlarını %20 oranında azaltma, 11 trilyon doların üzerinde ek gelir yaratma ve 2.5 milyondan fazla insana toplumsal fayda sağlama dahil olmak üzere "güçlü çevresel, ekonomik ve sosyal faydalar üretme potansiyeline sahip olduğunu" vurgulamaktadır (Beier vd., 2021). Richnak ve Fidlerova'nın (2022: 9) çalışmasının bulgularına göre SKH'ler en fazla sırasıyla makine mühendisliği (%38.9), otomotiv (%26.40), elektrik mühendisliği (%22.2), madencilik (%16.70) ve metalurji (%13.80) sektörlerinde uygulanmaktadır. Jayashree ve diğerleri (2021) Malezya'nın Sanayi 4.0 uygulamalarını benimsemesinin KOBİ'lere rekabetçi kalma konusunda yardımcı olacağını aynı zamanda SKH'lere ulaşılması sürecine katkı sağlayacağını ifade etmektedir. Olah ve diğerlerinin de (2020) ifade ettiği üzere Sanayi 4.0 araçlarının etkili kullanımı, Sanayi 4.0 araçlarıyla SKH'lerin bütünleştirilmesine neden olmaktadır. Bu da verimlilikte artışa, yenilenebilir ve yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarının etkili kullanımına yol açmaktadır. Pansare ve diğerlerinin (2023) çalışmasının bulguları akıllı fabrikaların benimsenmesinin SKH'ye ulaşılması açısından kritik önemde olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde SKH'ler ile tarım ve gıda sanayisindeki üretim uygulamaları arasında güçlü bağlantılar bulunduğunu vurgulayan Hassoun ve diğerleri (2022), akıllı fabrikaların yeşil gıda işleme sürecinde etkili olduğunu ifade etmektedir.

ElMassah ve Mohieldin'in (2020) çalışmalarında bahsettiği üzere hükümetlerin SKH'leri yerelleştirmeleri, yerel düzeyde sürdürülebilir kalkınma stratejilerinin etkili bir şekilde tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. SKH'leri yerelleştirmek, sürdürülebilir kalkınma stratejilerini izleme ve değerlendirmeyi ulusal bağlamlara uyarlamak ve SKH'lere aşağıdan yukarıya olacak bir biçimde başarılı şekilde ulaşılması sürecine yerel ve bölgesel yönetimlerin katkı sağlayabilmesine olanak tanıyan bir süreçtir (ElMassah ve Mohieldin, 2020: 2). Sürdürülebilir kalkınmanın yerelleştirilmesi hem merkezi hem de merkezi olmayan yönetim biçimlerinin avantajlarının kullanılmasına imkân vermektedir. Yerelleştirme çerçevesi, ulusal güvenlik unsurlarını içermekte ve daha küçük birimleri ulusal politika ve kalkınma gündemleriyle tam bir uyum içinde tutmaktadır. Aynı zamanda bu çerçeve yerel toplumlara daha iyi hizmet sunmakta, etkin politika yönetimi sağlamakta ve yerel düzeyde yerel toplumların önceliklerini daha iyi anlamalarına olanak tanımaktadır. Özellikle Sanayi 4.0 araçları sürdürülebilir kalkınmanın yerelleştirilmesini sağlamak için SKH'lerin sahipliğini bireyler arasında yayarak daha iyi hizmet sunumunu teşvik etmek amacıyla hükümetlere etkili araçlar sunan sanal bir merkezleşmenin kurulmasına imkân tanımaktadır (ElMassah ve Mohieldin, 2020).

Literatürdeki bazı çalışmalar, doğrudan Sanayi 4.0'ın katkı sunabileceği SKH'ler üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmaların odaklandığı SKH'ler farklılık göstermektedir. Bunun en önemli nedeni çalışmaların odaklandığı sektör, ele alınan Sanayi 4.0 araçları ve çalışma amacının farklılaşmasıdır. Örneğin, Kluczek ve diğerlerinin (2023) çalışma bulguları, baskı ve ambalaj şirketlerinin bazı SKH'lere (SKH-8, SKH-9 ve SKH-

12) çoğunlukla Sanayi 4.0 araçlarıyla (siber güvenlik, sistem entegrasyonu, bulut bilişim, büyük veri ve IoT) ulaşıldığını ortaya çıkarmıştır. Aranvidaraj ve Chinna'nın (2022) literatürden elde ettiği bulgular, depo yönetiminde Sanayi 4.0 uygulanmasının SKH-2, SKH-4, SKH-7, SKH-9, SKH-12 ve SKH-13'e katkı sağlayacağını göstermektedir. Bonilla ve diğerleri (2018) ve Olah ve diğerleri (2020) ise çevresel sürdürülebilirlikle ilişkili gördükleri SKH'lere odaklanırken, Beier ve diğerleri (2021) analizlerini endüstriyel üretimle doğrudan ilişkili olduğunu düşündüklerini SKH-8, SKH-9 ve SKH-12 üzerine yoğunlaştırmışlar ve dolaylı yoldan ilişkilendirilebilecek hedefleri (SKH-1, SKH-7 ve SKH-13) göz ardı etmişlerdir. Benzer şekilde Richnak ve Fidlerova'da (2022), endüstriyel üretimle en fazla ilişkiye sahip olduğunu düşündükleri SKH-7, SKH-8, SKH-9, SKH-12, SKH-13, SKH-14 ve SKH-15 üzerine yoğunlaşmışlardır. Vardanega ve diğerleri (2022) ise üstkritik akışkan ekstraksiyonu (SFE)⁵ teknolojisinin SKH-9 üzerindeki etkisine odaklanmışlardır. Orta Doğu ve Kuzey Afrika (MENA) ülkelerinin Sanayi 4.0'ı benimsemesinin sürdürülebilir kalkınma açısından önemine değinen Chen ve diğerleri (2021), dijital dönüşümün SKH-4, SKH-7 ve SKH-9'a sağladığı katkılar üzerine yoğunlaşmıştır. Vinuesa ve diğerlerinin (2020) çalışmasında aktardığı üzere AI'nin gelişimi SKH'lerin %79'u üzerinde olumlu etki yaratabilecekken, %35'i üzerinde olumsuz etkiye neden olabilecektir. Bu nedenle yazarlar çalışmalarında, AI'nin katkı sunabileceği SKH'ler üzerine odaklanmışlardır (Vinuesa vd., 2020). Bahsi geçen çalışmalar ve Sanayi 4.0'ın katkı sunabileceği SKH'ler Tablo 3'de aktarılmaktadır.

⁵ Üstkritik akışkan ekstraksiyonu (SFE), yüksek basınç ve yüksek sıcaklık koşullarında kullanılan bir ekstraksiyon yöntemidir. Bu yöntem, özellikle bitkilerden veya doğal kaynaklardan biyoaktif bileşenlerin çıkarılması için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tablo 3. Sanayi 4.0'ın Katkıda Bulunabileceği Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Bonilla vd. (2018)																	
Fatimah vd. (2020)																	
Olah vd. (2020)																	
Nhamo vd. (2020)																	
Vinuesa vd. (2020)																	
Beier vd. (2021)																	
Chen vd. (2021)																	
Dantas vd. (2021)																	
Mhalanga (2021)																	
Aravindaraj ve Chinna (2022)																	
Richnak ve Fidlerova (2022)																	
Vardanega vd. (2022)																	
Kluczek vd. (2023)																	

Kaynak: Tablo yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Çalışmanın devamında, Beier ve diğerlerinin (2021) yaklaşımına benzer şekilde endüstriyel üretimle doğrudan ilişkili olan SKH-8, SKH-9 ve SKH-12'ye ulaşılmasında Sanayi 4.0 araçlarının etkisi Tablo 3'de bahsedilen çalışmalar üzerinden karşılaştırmalı bir şekilde analiz edilecektir.

SKH-8, ekonomik büyümeyi teşvik etmenin yanında aynı zamanda tüm insanlar için istihdam ve adil çalışma şartları sağlamayı amaçlamaktadır. Dantas ve diğerlerine (2021) göre bu hedef ele alınacak diğer hedefler arasında en tartışmalı olanıdır. Aynı şekilde Beier ve diğerleri de (2021) Sanayi 4.0'ın SKH-8'de ifade edilen insana yakışır istihdamın yaratılmasına ne ölçüde katkı sağlayabileceğinin net olmadığını ifade etmektedir. Bunun en önemli nedeni, Sanayi 4.0'ın nitelikli çalışan talebinde artışa neden olurken aynı zamanda niteliksiz çalışan sayısında azalma meydana getirmesidir. Beier ve diğerlerinin (2020) ele aldığı çalışmalarda, SKH-8'de vurgulanan küresel kaynak verimliliğini artırma ve ekonomik büyümenin çevresel bozulmalardan arındırılması hedefine odaklanırken, söz konusu çalışmalarda Sanayi 4.0 tarafından potansiyel olarak tetiklenen tüketim alışkanlıklarındaki değişikliklere özel olarak değinilmemiştir (Beier vd., 2020). Fatimah ve diğerlerinin (2020) ifade ettiği üzere, Sanayi 4.0 teknolojilerinin uygulanması çöp ve atık toplayıcıları gibi birçok atık yönetimi çalışanına daha iyi ücret, daha fazla saygı ve daha iyi bir sosyal yaşam sunarak, onları resmi atık yönetim sisteminin önemli bir katılımcısı olarak görülmesine olanak sağlamaktadır. Bu açıdan SKH-8'e önemli bir katkı sağlayabilecektir. Ayrıca Dantas ve diğerlerinin (2021) aktardığı üzere, üretim süreçlerinde Sanayi 4.0 araçlarının kullanımının yüksek üretkenlik düzeylerine neden olması SKH-8 açısından oldukça önemlidir.

SKH-9; dayanıklı altyapıların inşasını, kapsayıcı ve sürdürülebilir sanayileşmenin desteklenmesini ve inovasyonun güçlendirilmesini amaçlamaktadır. AI'nin SKH'lere ulaşılmasında önemli rol oynayabileceğini ifade eden Mhalanga (2021)'ya göre AI, SKH-9'da vurgulanan dayanıklı altyapıların inşası sürecine önemli katkı sağlayabilecektir. Altyapıyı iyileştirmek için ulaştırma ve tarım gibi çeşitli sektörlerde AI müdahaleleri uygulanabilmektedir (Mhalanga, 2021: 8). SKH-9'un hedefleri ekonomik, ekolojik, sosyal ve sosyo-ekonomik konularla ilgilidir. SKH-8'de açıklanan içeriklerle uyumlu olarak Beier ve diğerleri (2021), Sanayi 4.0'ın sanayi gelişimi üzerinde verimlilikte artış ve maliyetlerde azalma gibi olumlu etkilere neden olacağını öne sürmektedirler. Literatür çalışması kapsamında incelenen makalelerde "çalışanların giderek daha fazla yaratıcı, yenilikçi ve iletişimsel faaliyetlere odaklanacağı" ve "teknolojik yeniliklerin ürünleri ve hizmetleri sürekli olarak değiştireceği ve bu nedenle işgücünün sürekli olarak yeni bilgi ve yeteneklerle donatılması gerekeceği vurgulanmaktadır. Bu durum, Sanayi 4.0'ın yeni meslek oluşturmakla SKH-9'a katkıda bulunup bulunmayacağı konusunda tartışmalar yaratmaktadır (Beier vd., 2021). Nhamo ve diğerlerinin (2020) çalışmasında aktarıldığı üzere, SKH 9, "dayanıklı altyapı inşa etmeyi, kapsayıcı ve sürdürülebilir sanayileşmeyi ve yeniliği teşvik etmeyi" hedeflediği için Sanayi 4.0 ile doğrudan bağlantılıdır. Dantas ve diğerlerine (2021) göre SKH-9, kapsayıcı ve sürdürülebilir sanayileşmenin teşvik edilmesi için gerekli olan altyapının oluşturulması ve sürdürülebilir sanayileşmenin desteklenmesi açısından Sanayi 4.0'la en fazla ilişkili olan hedefdir. Küçük ve Orta Ölçekli İşletmelerde (KOBİ'ler) artan ve sürekli üretimin, malzemelerin birikmesine, alan sıkışıklığına ve zaman kaybına neden olması sonraki üretim operasyonları için gereken paletlerin ve bileşenlerin ortadan kaybolmasına yol açmaktadır. Bu sorunları aşmak için, QR kodunun depolarda kullanımı, KOBİ'lerde malzeme akışının artırılmasına yardımcı olmaktadır (Aravindaraj ve Chinna, 2022). Aravindaraj ve Chinna'ya (2022) göre SKH-9 kapsamında gelişmekte olan ülkelerdeki hükümetler sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla KOBİ'lerin QR kodlarını güncellemeye teşvik etmelidir. Çalışma kapsamında incelenen bazı araştırmalar otomatik depo yönetim sisteminin üretkenlik, personel güvenliği gibi sürdürülebilirlik alanlarında gelişme sağladığını ifade etmektedir (Aravindaraj ve Chinna, 2022). Maddeleri kritik noktalarının üzerindeki sıcaklık ve basınçlarda kullanmayı sağlayan bir teknik olan üstkritik akışkan ekstraksiyonu (SFE), SKH-9'a önemli katkı verebilecektir. SFE, CO₂ gibi toksik olmayan çözücüler kullanan ve hammaddeleri yoğun bir şekilde kullanan süreçlerde değerli doğal ürünleri sürdürülebilir şekilde elde etmenin bir yolunu sağlayabilecektir (Vardanega vd., 2022).

SKH-12, sürdürülebilir üretim ve tüketim kalıplarının güvence altına alınmasını amaçlamaktadır. Hedeflerinden biri kirliliği, emisyonları ve atığı atık önleme, azaltma, geri dönüşüm ve yeniden kullanım yoluyla azaltmaktır. Bu yeni sistem; uygun, otomatik ve entegre atık toplama, ayrıştırma ve işleme yoluyla

çevresel sorunları önemli ölçüde azaltılabilecek bir çözüm sunmayı amaçlamaktadır (Fatimah vd., 2020). SKH-12'nin hedefleri ekolojik, sosyo-ekolojik ve sosyal, ekonomik ve ekolojik boyutları birleştiren konularla ilgilidir. Beier ve diğerlerinin (2021) literatür taraması sonuçlarına göre en çok kaynakların yönetimi ve verimli kullanımına vurgu yapılmaktadır. Ayrıca atıkların sürdürülebilir yönetimine de değinilmektedir. İncelenen çalışmaların çoğu Sanayi 4.0'ın üretim süreçleri tarafından oluşturulan atık, kirletici ve emisyonların azaltılmasına yardımcı olacağını öne sürmektedir (Beier vd., 2021). Dantas ve diğerlerine göre (2021) Sanayi 4.0, bu hedefe ulaşmak için önemli araçları bünyesinde barındırmaktadır. Aravindaraj ve Chinna (2022)'nin ifade ettiği üzere AI'nin depo yönetiminde uygulanmasıyla mevcut ürün sayısını eksiksiz olarak belirlenmesi, malzemelerin zarar görmesini engelleyerek ve ham maddelerin aşırı kullanımını azaltarak SKH-12'ye ulaşılması sürecine katkıda bulunabilecektir. Aynı zamanda depo yönetiminde blok zincir teknolojisinin uygulanması, gıda tahılı hırsızlığı ve sızıntısını engelleyerek şeffaflık sağlamaktadır. Ayrıca kaynakların verimli kullanımını sağlayarak SKH-12'ye ulaşılmasını desteklemektedir.

Sanayi 4.0 araçlarının SKH'ler üzerindeki olumlu etkilerine rağmen, Schwab ve Davis (2019)'ın Sanayi 4.0 teknolojilerinin üretebileceği riskler konusundaki uyarılarını dikkate almak gerekmektedir. Yazarlara göre Sanayi 4.0 teknolojilerinin gücü ve bunların karmaşık sosyal ve çevresel sistemlerde yaratabileceği uzun vadeli etkileriyle ilgili belirsizlik söz konusudur. Bu çerçevede biyosferde ani ve geri döndürülemez tahribata yol açabilecek jeomühendislik girişimlerinin yaratacağı riskler dile getirilmektedir. Ayrıca yazarlar Sanayi 4.0'ın eşitsizlikleri arttırma ve insanı güçsüzleştirme potansiyeline dikkat çekmektedir (Aktaş, 2021: 113). Vinuesa ve diğerlerinin (2020) aktardığı üzere, AI'nin SKH'lere ulaşılması sürecinde önemli katkılar sağlayabilmesine karşın, aynı zamanda SKH-1, SKH-2, SKH-4 ve SKH-5 açısından çeşitli eşitsizlikleri de tetikleyebilecektir. Örneğin, AI destekli tarım ekipmanlarının küçük çiftçiler için erişilmez olması SKH-2 hedefinin gerçekleşmesi açısından engelleyici olabilecektir. Kısacası Sanayi 4.0'ın SKH'ler kapsamında önemli avantaj ve dezavantajları beraberinde getirdiği anlaşılmakta ve Sanayi 4.0'a dönüşüm sürecinde sürdürülebilirliğe daha fazla dikkat çekilmektedir. Bu doğrultuda insan ihtiyaçlarının çok boyutlu doğası göz önünde bulundurularak insan refahının sosyal, iktisadi ve çevresel bileşenlerinin gözetilme ihtiyacı daha fazla dile getirilmektedir.

6. Sonuç ve Öneriler

Günümüzde ülkelerin Sanayi 4.0 teknolojilerini benimsemesi bir zorunluluk olarak ön plana çıkmaktadır. Özellikle Sanayi 4.0 teknolojilerinin çevresel sorunları çözme konusunda olumlu katkılarının bulunması, sürdürülebilirlik tartışmalarının Sanayi 4.0'ı da içerecek şekilde ele alınmaya başlanmasına neden olmuş ve Sürdürülebilirlik 4.0 kavramı tartışmaların öznesi konumuna gelmiştir. Her ne kadar Sanayi 4.0'ın ortaya çıkış amacı, motivasyonu ve odak noktası sürdürülebilirlik olmasa da Sanayi 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirlik konusunda önemli katkı sağlayacağı yönünde olumlu beklentileri destekleyecek gelişmelerin yaşandığı görülmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde sürdürülebilirliğin bütüncül bir yaklaşımla ele alındığı ve çevresel sürdürülebilirlik kadar, iktisadi ve sosyal sürdürülebilirlik arasındaki denge ve uyumun gerekliliği vurgulanmaktadır. Üreticilerin sadece kârı odağına alarak mal ve hizmet üretiminde bulunmaları sürdürülebilir üretimi desteklememektedir. Bunun en temel nedeni mevcut dünyanın sınırlarına ulaşıldığının farkına varılmış olmasıdır. Artık sürdürülebilir olmayan üretim yöntemlerini kullanmanın ekonomik, sosyal ve çevresel maliyetleri giderek ağırlaşmaktadır. Her ne kadar Sanayi 4.0'ın sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri çevresel, sosyal ve ekonomik olarak sınıflandırılrsa da bu etkiler arasındaki etkileşim dikkate alınmalıdır. Literatürde yoğun şekilde Sanayi 4.0'ın sürdürülebilirlik boyutları açısından olumlu etkileri ön plana çıkarılrsa da bazı olumsuz etkilerinin de olduğu görülmektedir. Her ne kadar esnek çalışmanın olumlu yönleri sıklıkla vurgulansa da özellikle iş – özel hayat dengesini bozması bireylerin kendi hayatlarına dair karar verici konumdan çıkmalarına yol açmaktadır. Bu durum özellikle bireylerin sosyal yaşamını olumsuz etkilemektedir. Sonuç olarak Sanayi 4.0'ın avantaj ve dezavantajları sağduyulu bir şekilde ele alınmalı, insan yaşamı ve doğal kaynakların sürdürülmesinde önemli etkilerinin olduğu göz ardı edilmemelidir. Bu bağlamda Sürdürülebilirlik 4.0'ın bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gereği ortaya çıkmaktadır.

Sanayi 4.0'ın uygulamalarıyla sürdürülebilirliğin -TBL yaklaşımında belirtildiği gibi- üç boyutunun bütünleştirilmesi sürdürülebilir kalkınmanın gerçekleştirilebilmesi açısından önemli bir adımdır. Bu doğrultuda Sanayi 4.0'ı sürdürülebilir kalkınma hedefleri çerçevesinde mercek altına alan çalışmalar, dönüşümün avantaj ve dezavantajlarını göstermesi yanında literatürdeki boşlukların anlaşılmasında da büyük rol oynamaktadır.

Son yılların güncel tartışma konusu olan SKH'lere ulaşılması sürecinde Sürdürülebilirlik 4.0'ın önemli bir araç olduğu anlaşılmaktadır. Literatür incelendiğinde Sanayi 4.0'ın çeşitli SKH'lere katkı sunduğu görülmektedir. Bu çalışmada sürdürülebilir üretimle ilişkili olan SKH-8, SKH-9 ve SKH-12 hedeflerine ulaşılması sürecinde Sanayi 4.0 uygulamalarının etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Sürdürülebilirlik açısından dijital dönüşüm sürecinin olumlu katkılar sunabileceğine yönelik iyimser beklentiler oluşmasına rağmen, gelişen ve dönüşen Sanayi 4.0 sürecinin sürdürülebilir kalkınma amaçlarına ulaşmadaki rolü yeterince açık ve net değildir. Dolayısıyla Sanayi 4.0'la sürdürülebilirlik arasındaki ilişkinin tam olarak ortaya konulabilmesi için literatürde eksikliği görülen nicel ve nitel saha çalışmalarının sayıca artırılması gerekmektedir. Ancak bu şekilde Sanayi 4.0 ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişki teorik tartışmaların dışına çıkarılarak, reel sektörle ilişkilendirilebilecek ve politika yapıcılara yönelik önerilerde bulunma imkânı doğabilecektir. Diğer taraftan konunun güncelliği ve önemi düşünüldüğünde dijital dönüşüm sürecinde sürdürülebilirliği göz önünde bulunduran çalışmaların sayıca artması beklenebilir.

Kaynaklar

- Ahmad, S. (2015), Green human resource management: policies and practices, *Cogent Business & Management*, 2(1), 1-13.
- Aktaş, M. T. (2021), Sürdürülebilir insani kalkınma, toplum 5.0 ve yapay zekâ, S. Alçın, B. Erdil Şahin, D. D. Dereli, M. Hamzaoğlu & İ. Ertek (Ed.), *Gelecekte Ekonomi* içinde (ss. 107-132). İstanbul: İstanbul Kültür Üniversitesi Yayınları.
- Alemdar, A. A. (2021, 22 Şubat), *Gig ekonomisi: emeğin yeni ucuz formu*, Gergedan Dergi, <https://gergedan.press/gig-ekonomisi-emeğin-yeni-ucuz-formu-9071/>
- Ali, K., ve Johl, S. K. (2023), Driving forces for industry 4.0 readiness, sustainable manufacturing practices and circular economy capabilities: does firm size matter?, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 34(5), 838-871.
- Al-Zyadat, A. T., Alsarairoh, J. M., Al-Husban, D. A. O., Al-Shorman, H. M., Mohammad, A. A. S., Alathamneh, F. F., ve Al-Hawary, S. I. S. (2022), The effect of industry 4.0 on sustainability of industrial organizations in Jordan. *International Journal of Data and Network Science*, 6(4), 1437-1446.
- Aravindaraj, K., ve Chinna, P. R. (2022), A systematic literature review of integration of industry 4.0 and warehouse management to achieve Sustainable Development Goals (SDGs), *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 5, 1-12.
- Bag, S., Telukdarie, A., Pretorius, J. H.C., ve Gupta, S. (2021), Industry 4.0 and supply chain sustainability: framework and future research directions, *Benchmarking: an International Journal*, 28(5), 1410-1450.
- Bağcı, E. (2018), Endüstri 4.0: yeni üretim tarzını anlamak, *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 9(24), 122-146.
- Bai, C., Dallasesa, P., Orzes, G., ve Sarkis, J. (2020), Industry 4.0 technologies assesment: a sustainability perspective, *International Journal of Production Economics*, 229, 1-15.

- Bakshi, B. R., ve Paulson, J. A. (2022), *Sustainability and Industry 4.0: obstacles and opportunities*, 2022 American Control Conference (ACC), USA.
- Barbier, E. (2011), The policy challenges for green economy and sustainable economic development, *Natural Resources Forum*, 35(3), 233-245.
- Beier, G., Niehoff, S., ve Hoffmann, M. (2021), Industry 4.0: a step towards achieving the SDGs? a critical literature review, *Discover Sustainability*, 2(22).
- Beltrami, M., Orzes, G., Sarkis, J., ve Sartor, M. (2021), Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory, *Journal of Cleaner Production*, 312, 1-21.
- BM (1992), Çevre ve Gelişim Hakkında Rio Deklarasyonu, <https://kumid.net/euproject/admin/userfiles/dokumanlar/cevreilave02.pdf>
- Bonilla, S. H., Silva, H. R. O., da Silva, T., Gonçalves, R. F., ve Sacomano, J. B. (2018), Industry 4.0 and sustainability implications: a scenario-based analysis of the impacts and challenges, *Sustainability*, 10(10), 1-24.
- Buhr, D. (2017), *Social innovation policy for Industry 4.0*, Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Chen, M., Sinha, A., Hu, K., ve Shah, M. I. (2021), Impact of technological innovation on energy efficiency in industry 4.0 era: moderation of shadow economy in sustainable development, *Technological Forecasting and Social Change*, 164, 1-10.
- Ching, N. T., Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Maroufkhani, P., ve Asadi, S. (2022), Industry 4.0 applications for sustainable manufacturing: a systematic literature review a road map to sustainable development, *Journal of Cleaner Production*, 334, 1-18.
- Cochran, D. S., ve Rauch, E. (2020), Sustainable enterprise desing 4.0: addressing industry 4.0 technologies from the perspective of sustainability, *Procedia Manufacturing*, 51, 1237-1244.
- Dantas, T. E. T., de-Souzaü E. D., Destro, I. R., Hammers, G., Rodriguez, C. M. T., ve Socres, S. R. (2021), How the combination of circular economy and industry 4.0 can contribute towards achieving the sustainable development goals, *Sustainable Production and Consumption*, 26, 213-227.
- De Alwis, A. M. L., De Silva, N., ve Samaranyake, P. (2023), Industry 4.0-enabled sustainable manufacturing: current practices, barriers and strategies, *Benchmarking: An International Journal*, Erken Görünüm.
- De-Souso Jabbour, A. B. L., Jabbour, C. J. C., Foropan, C., ve Filho, M. G. (2018), When titans meet – can industry 4.0 revolutionise the environmentally- sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors, *Technological Forecasting & Social Change*, 132, 18-25.
- ElMassah, S., ve Mohieldin, M. (2020), Digital transformation and localizing the Sustainable Development Goals (SDGs), *Ecological Economics*, 169, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106490>
- Enyoghasi, C., ve Badurdeen, F. (2021), Industry 4.0 for sustainable manufacturing: Opportunities at the product, process, and system levels, *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 1-14.

- Erol, S. (2016), *Where is the green in industry 4.0? or how information systems can play a role in creating intelligent and sustainable production systems of the future*, First Workshop on Green (Responsible, Ethical, Social/Sustainable) IT and IS – the Corporate Perspective (GRES-IT/IS), Austria.
- Esses, D., Csete, M. S., ve Nemeth, B. (2021), Sustainability and Digital Transformation in the Visegrad Group of Central European Countries. *Sustainability*, 13(11), 1-14.
- Eşkinat, R. (2016), Bin yıllık kalkınma hedeflerinden sürdürülebilir kalkınma hedeflerine. *Anadolu Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 2(3), 267-282.
- Fatimah, Y. A., Govindan, K., Murniningsih, R., ve Setiawan, A. (2020), Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: a case study of Indonesia, *Journal of Cleaner Production*, 269.
- Gabriel, M., ve Pessl, E. (2016), Industry 4.0 and sustainability impacts: critical discussion of sustainability aspects with a special focus on future of work and ecological consequences, *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 14(2), 131-136.
- Garretson, I. C., Mani, M., Leong, S., Lyons, K. W., ve Haapala, K. R. (2016), Terminology to support manufacturing process characterization and assessment for sustainable production. *Journal of Cleaner Production*, 139, 986-1000.
- Ghobakhloo, M. (2020), Industry 4.0, digization, and opportunities for sustainability, *Journal of Cleaner Production*, 252, 1-21.
- Guerci, M., Montanari, F., Scapolan, A., ve Epifanio, A. (2016), Green and nongreen recruitment practices for attracting job applicants: exploring independent and interactive effects. *The International Journal of Human Resource Management*, 27(2), 129-150.
- Gupta, H., Kumar, A., ve Wasan, P. (2021), Industry 4.0, cleaner production and circular economy: an integrative framework for evaluating ethical and sustainable business performance of manufacturing organizations, *Journal of Cleaner Production*, 295, 1-18.
- Hassoun, A., Prieto, M. A., Carpena, M., Bouzembrak, Y., Marvin, H. J. P., Pallares, N., Barba, F. J., Bangar, S. P., Chaudhary, V., Ibrahim, S., ve Bono, G. (2022), Exploring the role of green and industry 4.0 technologies in achieving sustainable development goals in food sectors, *Food Research International*, 162(B), 1-16.
- Henao-Hernández, I., Solano-Charris, E. L., Munoz-Villamizar, A., Santos, J., ve Henriquez-Machado, R. (2019), Control and monitoring for sustainable manufacturing in the Industry 4.0: A literature review, *IFAC-PapersOnLine*, 52(10), 195-200.
- Holden, E., Linnerud, K., ve Banister, D. (2017), The imperatives of sustainable development, *Sustainable Development*, 25(3), 213-226.
- İnançlı, S. (2018), *Ulusal ve uluslararası boyutta çevre ekonomisi*, Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Jabbour, C. J. C. (2013), Environmental training in organisations: From a literature review to a framework for future research, *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 144-155.

- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., 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.
- Jayashree, S., Reza, M. N. H., Malarvizhi, C. A. N. M., ve Mohiuddin, M. (2021), Industry 4.0 implementation and triple bottom line sustainability: an empirical study on small and medium manufacturing firms, *Heliyon*, 7(8), 1-14.
- Kluczek, A., Gladysz, B., Buczacki, A., Krystosiak, K., Ejsmont, K., ve Palmer, E. (2023). Aligning sustainable development goals with Industry 4.0 for the desing of business model for printing and packaging companies, *Packaging Technology and Science – An International Journal*, 36(4), 307-325.
- Kumar, V., Vrat, P., ve Shankar, R. (2021), A graph-theoretic approach to evaluate the intensity of barriers in the implementation of industry 4.0, *International Journal of Innovation and Technology Management (IJITM)*, 18(08), 1-41.
- Kumar, V., Vrat, P., ve Shankar, R. (2022), Factors influencing the implementation of industry 4.0 for sustainability in manufacturing, *Global Journal of Flexible Systems Management*, 23(4), 453-478.
- Lazol, İ., Muğal, E., ve Yücel Y. (2008), Sürdürülebilir bir çevre için çevre muhasebesi ve KOBİ'lere yönelik bir araştırma. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, 38, 56-69.
- Lupi, F., Mabkhot, M. M., Finzgar, M., Minetola, P., Stadnicka, D., Maffei, A., ve Lanzetta, M. (2022), Toward a sustainable educational engineer archetype through Industry 4.0, *Computers in Industry*, 134, 1-16.
- Luthra, S., ve Mangla, S. K. (2018), Evaluating challenges to industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies, *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 168-179.
- Machado, C. G., Winroth, M. P., ve Ribeiro da Silva, E. H. D. (2020), Sustainable manufacturing in industry 4.0: an emerging research agenda, *International Journal of Production Research*, 58(5), 1462-1484.
- Machado, C. G., Winroth, M., Almström, P., Ericson Öberg, A., Kurdve, M., ve AlMashalah, S. (2021), Digital organisational readiness: experiences from manufacturing companies, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(9), 167-182.
- Maqbool, R., Salba, M. R., ve Ashfaq, S. (2023), Emerging industry 4.0 and internet of things (IoT) technologies implementation, challenges and benefits, *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 37076-37091.
- Masri, H. A., ve Jaaron, A. A. M. (2017), Assessing green human resources management practices in Palestinian manufacturing context: an empirical study, *Journal of Cleaner Production*, 143, 474-489. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.087>
- Mhalanga, D. (2021), Artificial intelligence in the Industry 4.0, and its impact on poverty innovation, infrastructure development, and the sustainable development goals: lessons from emerging economies?, *Sustainability*, 13(11), 1-16.

- Munsamy, M., ve Telukdarie, A. (2018), *Application of industry 4.0 towards achieving business sustainability*, IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Thailand, Bangkok.
- Muster, V., ve Schrader, U. (2011), Green work-life balance: a new perspective for green HRM, *Zeitschrift Für Personalforschung / German Journal of Research in Human Resource Management*, 25(2), 140-156.
- Nhamo, G., Nhemachena, C., ve Nhamo, S. (2020), Using ICT indicators to measure readiness of countries to implement Industry 4.0 and the SDGs, *Environmental Economics and Policy Studies*, 22, 315-337.
- Olah, 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), 1-21.
- Özcan, B. A. (2020), Ortak mülkiyet çerçevesinde iklim değişikliği sorununun çözümünde Kyoto Protokolü'nün etkisi, *Akdeniz İİBF Dergisi*, 20(2), 169-184.
- Özdemir, A., ve Özgüner, M. (2018), Endüstri 4.0 ve lojistik sektörüne etkileri: lojistik 4.0, *İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*, 6(4), 39-47.
- Pansare, R., Yadav, G., Garzo-Reyes, J. A., ve Nagare, M. R. (2023), Assessment of sustainable development goals through industry 4.0 and reconfigurable manufacturing system practices, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 34(3), 383-413.
- Pirdal, B. (2023), *Enerji ve iklim krizleri gölgesinde yeşil ekonomi: bütçe politikalarının rolü ve önemi*, M. T. Aktaş (Ed.), *İklim ve enerji krizi kısılcacında iktisadi kalkınma içinde* (ss. 55-74). İstanbul: Efeakademi Yayınları.
- Rahardjo, B., Wang, F., Yeh, R., ve Chen, Y. (2023), Lean Manufacturing in Industry 4.0: A Smart and sustainable manufacturing system, *Machines*, 11(1), 1-17.
- Ramirez-Penã, M., Sotano, A. J. S., Pe´rez-Fernandez, V., Abad, F. J., ve Batista, M. (2020), Achieving a sustainable shipbuilding supply chain under I4. 0 perspective, *Journal of Cleaner Production*, 244, 1-20.
- Richnak, P., ve Fidlerova, H. (2022), Impact and potential of sustainable development goals in dimnesion of the technological revolution industry 4.0 within the analysis of industrial enterprises. *Energies*, 15(10), 1-20.
- Rojko, A. (2017), Industry 4.0 concept: background and overview, *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 11(5), 77-90.
- Romero Gázquez, J. L., Bueno Delgado, M. V., Ortega Gras, J. J., Garrido Lova, J., Gómez Gómez, M. V., ve y Zbiec, M. (2021), Lack of skills, knowledge and competences in higher education about industry 4.0 in the manufacturing sector, *Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 24(1), 285-313.
- Sammalisto, K., ve Brorson, T. (2008), Training and communication in the implementation of environmental management systems (ISO 14001): a case study at the University of Gävle, Sweden, *Journal of Cleaner Production*, 16(3), 299-309.
- Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2019), *2023 Sanayi ve Teknoloji Stratejisi*. Ankara: T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, <https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/SanayiStratejiBelgesi2023.pdf>

- Sartal, A., Bellas, R., Mejias, A. M., ve Garcia-Collada, A. (2020), The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: A literature review, *Advances in Mechanical Engineering*, 12(5), 1-17.
- Schwab, K., ve Davis, N. (2019), *Dördüncü sanayi devrimini şekillendirmek* (Özata, N., Çev.), İstanbul: Optimist Yayın Grubu.
- Shah, S., Menon, S., Ojo, O. O., ve Nayhi Ganji, E. (2020), *Digitalisation in Sustainable Manufacturing – A Literature Review*, IEEE International Conference Technology Management, Morocco, Marrakech.
- Siltori, P. F. S., Anholan, R., Rampasso, I. S., Quelhas, O. L. G., Sante-Eulalia, L. A., ve Filho, W. L. (2021), Industry 4.0 and corporate sustainability: an exploratory analysis of possible impacts in the brazilian context, *Technological Forecasting & Social Change*, 167, 1-9.
- Spöttl, G., ve Windelband, L. (2020), The 4th industrial revolution – its impact on vocational skills. *Journal of Education and Work*, 34(1), 29-52.
- Stăncioiu, A. (2017), The fourth industrial revolution “industry 4.0”, *Fiability & Durabilty*, 1(19), 74-78.
- Suswanto, H., Fauzi, J. A., ve Wibawa, A. P. (2019). *Has the VS ready for industry 4.0?*, International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE), Indonesia, 350-353.
- Toker, K. (2018), Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirliğe Etkileri, *İstanbul Management Journal*, 29(84), 51-64.
- Tseng, M. L., Zhu, Q., Sarkis, J., ve Chiu, A. S. (2018), Responsible consumption and production (RCP) in corporate decisionmaking models using soft computation. *Industrial Management & Data Systems*, 118(2), 322-329.
- Vardanega, R., Osorio-Tobon, J. F., ve Duban, K. (2022), Contributions of supercritical fluid extraction to sustainable development goal 9 in South America: industry, innovation, and infrastructure, *The Journal of Supercritical Fluids*, 188, 1-16.
- Varela, L., Araujo, A., Avila, P., Castro, H., ve Putnik, G. (2019), Evaluation of the Relation between Lean Manufacturing Industry 4.0, and Sustainability, *Sustainability*, 11(5), 1-19.
- Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., Fellander, A., Langhans, S. D., Tegmark M., ve Nerini, F. F. (2020), The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals, *Nature Communications*, 11, 1-9.
- Wang, S., Wan, J., Li, D., ve Zhang, C. (2016), Implementing smart factory of industrie 4.0: an Outlook, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 1-10.
- WCED (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>, Erişim Tarihi, 06.01.2024.
- Wirtenberg, J., Harmon, J., Russell, W., ve Fairfield, K. D. (2007), HR's role in building sustainable enterprise: insights from some of the world's best companies, *Human Resources Planning*, 30(1), 10-20.

- Yeni, O. (2014), Sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma: bir yazın taraması, *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 16(3), 181-208.
- Yıldırım, Y. (2019), Endüstri 4.0'a Kapsamlı Bir Bakış: 2011'den Bugüne, *Bilgi Dünyası*, 20(2), 217-249.
- Yong, J. Y., Yusliza, M., Jabbour, T. R. C. J. C., Sehnem, S., ve Mani, V. (2020). Pathways towards sustainability in manufacturing organizations: Empirical evidence on the role of green human resource management. *Business Strategy and the Environment*, 29(1), 212-228.
- Zaharah, S., Selamat, M. N., Alavi, K., ve Arifin, K. (2018), Industry 4.0: a systematic review in technical and vocational education and training, *Jurnal Psikologi Malaysia*, 32(4), 66-74.