

Citation: Özenir, İ. & Nakıboğlu, G. (2019), Sürdürülebilir Üretimde Endüstri 4.0'ın Yeri, BMIJ, (2019), 7(5): 2248-2281 doi: <http://dx.doi.org/10.15295/bmij.v7i5.1197>

SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİMDE ENDÜSTRİ 4.0'IN YERİ

İpek ÖZENİR¹

Gülsün NAKİBOĞLU²

Received Date (Başvuru Tarihi): 29/07/2019

Accepted Date (Kabul Tarihi): 02/12/2019

Published Date (Yayın Tarihi):25/12/2019

ÖZ

Endüstri devriminden günümüze dek bireylerin istek ve ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla sınırlı olan doğal kaynaklar sınırsız bir şekilde tüketilmeye devam edilmektedir. Uzun yıllardır hemen her ortamda üretimin ve tüketimin çevre üzerindeki etkileri dile getirilse de konu üretimin ve tüketimin ekonomik faydası boyutuna geldiğinde yapılması gereken değişiklikler ve düzenlemeler uygulanamamaktadır. Ancak son yıllarda çevresel problemlerin etkilerinin hissedilir boyutlara gelmesi gidişatı değiştirmiş, kaynakların sürdürülebilirliği önem kazanmaya başlamıştır. Bu aşamada, sürdürülebilirliğin sağlanması gereken alanlardan biri de üretimdir. Son zamanlarda sıklıkla kullanılan bir kavram olan Endüstri 4.0 ve teknolojileri, sürdürülebilir üretimi sağlama yollarından biridir. Endüstri 4.0 ile geleceğin akıllı fabrikaları, faaliyetlerin sürdürülebilirliğe uygun şekilde gerçekleştirilebilmesi için farklı teknik ve teknolojiler barındıran bir araç olarak kullanılabilir. Bu kavramlardan hareketle bu çalışmanın temel amacı Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir üretimde nasıl kullanılabilirliğinin ve sağlayabileceği faydaların ortaya çıkarılmasıdır. Çalışmada sanayi devrimleri, Endüstri 4.0, sürdürülebilirlik, sürdürülebilir üretim ve Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir üretimde nasıl kullanılabilirliğinden bahsedilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çevreye Duyarlı Üretim, Nesnelerin İnterneti, Siber-Fiziksel Sistemler

JEL Kodları: M110, M150, O330, Q200, Q560, Q570

THE ROLE OF INDUSTRY 4.0 IN SUSTAINABLE MANUFACTURING

ABSTRACT

Since the industrial revolution, earth's limited natural resources have been used as if they were limitless in order to meet the needs and demands of people. Although the impacts of production and consumption on the environment have been expressed for years in almost every platform, when it comes to their economic benefits, the necessary changes and arrangements cannot be actualised. However, with the effects of environmental problems being visibly experienced in recent years, things have been changing; and the sustainability of resources has begun to gain importance. In this regard, one of the areas that needs to be sustainable is manufacturing. A concept that have been used quite often recently, Industry 4.0 and its technologies are becoming more and more relevant, and are seen as a means to attain sustainable manufacturing. Industry 4.0 and the smart factories of the future can be used as instruments with different techniques and technologies to perform activities in a sustainable way. Based on these concepts, the main purpose of this study is to find out how Industry 4.0 can be used in sustainable manufacturing activities, and in what ways it can be beneficial. The study explores industrial revolutions, Industry 4.0, sustainability, sustainable manufacturing and how Industry 4.0 can be used in sustainable manufacturing.

Keywords: Environmental conscious manufacturing, Internet of Things, Cyber-physical Systems

JEL Codes: M110, M150, O330, Q200, Q560, Q570

¹ Öğr.Gör., Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Antakya MYO, ipekozenir@mku.edu.tr,

<https://orcid.org/0000-0002-0684-0938>

² Dr.Öğr. Üyesi, Çukurova Üniversitesi İİBF İşletme Bölümü, ngulsun@cu.edu.tr,

<https://orcid.org/0000-0002-6835-744X>

1.GİRİŞ

Var olduğu günden beri insanoğlunun doğa üzerinde hâkimiyet kurma çabası, endüstrinin ve teknolojinin gelişmesini sağlamış ancak çevre ile ilgili birçok sorunu da beraberinde getirmiştir. İklim değişikliği, küresel ısınma, asit yağmurları, toprak-su-hava-gürültü kirliliği, ozon tabakasının incilmesi, doğal kaynakların tükenmesi aşına olduğumuz çevresel sorunların sadece birkaçıdır. 18. yüzyılın sonlarında sanayi devrimi ile birlikte başlayan ve günümüze kadar gelen bu sorunlar, nüfusun artmasına bağlı olarak dünyada tüketim hızının artması, işletmelerin tüketim hızına yetişebilmek için üretim kaynaklarını bilinçsizce kullanması sonucunda hızla büyümüş ve çözülmesi zor bir problem haline gelmiştir. Çevre sorunlarının çözümü için dünya çapında birçok örgüt ve kuruluş çalışma yapmakta, ülkelere ve kurumlara çözüm önerileri sunmaktadır. Bu çabalar, sürdürülebilir kalkınma veya genel olarak sürdürülebilirlik başlığı altında toplanmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma, ülke ekonomilerinin temel yapı taşlarından biri olan üretim sistemlerine de yansımış ve sürdürülebilir üretim, yeşil üretim, çevreye dost üretim gibi birçok benzer başlık altında ele alınan çevreye zarar vermeden üretimin gerçekleştirilmesi çabalarını da başlatmıştır.

Günümüzün bilim dünyasında yeralan bir diğer önemli kavram da tüm dünyanın gelişmelerini takip ettiği 4. Sanayi Devrimi olarak da adlandırılan Endüstri 4.0 kavramıdır. 2011 yılında Almanya'da Hannover Fuarı'nda ortaya çıkan, uzun yıllar boyunca dünyanın gündeminde kalmaya devam edecek olan bu kavram aslında insanoğlunun hayal gücünün sınırsızlığını da göstermektedir. İlk üç sanayi devrimi, mekanizasyon, elektrik ve bilişim teknolojileri sonucunda ortaya çıkmış, günümüzde Nesnelerin ve Hizmetlerin İnternetinin üretim ortamına dâhil edilmesi, dördüncü sanayi devrimini başlatmıştır (Kagermann, Helbig, Hellinger ve Wahlster, 2013). Endüstri 4.0, fiziksel ve sanal dünyayı birleştirmekte, operasyonel verimliliği ve etkinliği artırmak amacıyla yüksek düzeyde otomasyonla çalışmayı amaçlamakta (Alcacer ve Cruz-Machado, 2019) ve akıllı ürünlerin ve üretim süreçlerinin kurulmasına odaklanmaktadır (Brettel, Friederichsen, Keller ve Rosenberg, 2014). Endüstri 4.0 bileşenlerinin hâkim olacağı dünyada geleceğin üretim vizyonu, modüler ve verimli üretim sistemlerini içermekte ve ürünlerin kendi üretim süreçlerini kontrol ettiği senaryolar ile tanımlanmaktadır (Lasi, Fettke, Kemper, Feld ve Hoffmann, 2014).

Çalışma kapsamında yukarıda bahsedilen günümüzün önemli iki konusu olan Endüstri 4.0 ve sürdürülebilir üretim kavramları birlikte ele alınmıştır. Çünkü endüstrileşme, bugün yaşanan kirlilik sorununun ve kısıtlı kaynaklar sebebiyle sürdürülemez üretim sistemlerinin

oluşmasının başlıca sebebidir. Üretim sürecinin mal ve hizmet şeklinde değer yaratan çıktılarının yanında, çevre üzerinde etkili olan istenmeyen çıktılar da söz konusudur. Üretimin doğal çevre üzerindeki negatif etkisi söz konusu olduğunda kaynak kullanımı, özellikle malzeme ve enerji kullanımı konuları ön plana çıkmakta, ardından sera gazı etkisi, zehirli atık oluşturma, su kullanımı, plastik gibi doğada çözülemez malzemeler ortaya çıkarması ve ürünün yaşam sonu geldiğinde doğaya etkisi konuları dikkat çekmektedir. Ekonomik yönü de dikkate alındığında, enerji ve malzeme gibi kısıtlı kaynakların kullanımının ve kaynak israfının azaltılması için üretim ortamlarının daha iyi yönetilebilecek hale getirilmesi önemlidir. Dolayısıyla çevresel sürdürülebilirlikte, çevre üzerindeki bu etkileri azaltacak çözümler önem kazanmaktadır (Garetti ve Taisch, 2012). Endüstri 4.0 ve bileşenlerinin bahsedilen bu olumsuzlukların birçoğunun ortadan kaldırılması/azaltılması, üretimin sürdürülebilirliğinin sağlanması konusunda oldukça önemli kavramlar olduğu düşünülmektedir. Endüstri 4.0 ve dâhilindeki teknolojilerin veri toplama, süreci izleme, dinamik kararlar alma gibi konularda bu amaçla kullanılması, son dönemlerde üretim yönetimi alanındaki en önemli konularından biridir. Aynı zamanda literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde Endüstri 4.0 ve sürdürülebilir üretim konuları üzerine ayrı ayrı birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Ancak her iki kavramı birlikte ele alan çalışma sayısının özellikle Türkçe literatürde oldukça az olması, her iki kavramın uzun yıllar boyunca önemini koruyacak olması, Endüstri 4.0'ın yeni bir kavram olması, gelişmelerinin henüz sürdürülebilir üretimde yeterince yer bulamaması sebeplerinden dolayı çalışmada her iki kavram birlikte ele alınmıştır. İzleyen bölümlerde öncelikle sanayi devrimleri incelenmiş, ardından Endüstri 4.0 ve sürdürülebilir üretim kavramları ve Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir üretimde nasıl kullanılabileceğine yer verilmiştir.

2. SANAYİ DEVRİMLERİNİN GELİŞİMİ

Dünyada endüstriyel ve kültürel ilerlemenin temel adımlardan birinin 1. Sanayi Devrimi olduğu düşünülmektedir. 1. Sanayi Devrimi, buhar motorunun geliştirilmesi ve ağır mekanik üretim ekipmanlarının devreye girmesiyle, 2. Sanayi Devrimi konveyör bandının ve montaj hattının kullanılmasına izin veren elektrik kullanımı ile 3. Sanayi Devrimi elektronik, bilgi ve iletişim teknolojilerinin yoğun kullanımı sonucu üretim süreçlerinin otomasyonu ile başlamış ve son olarak siber teknolojilerin gelişmesi ve bunların tüm endüstri değer zincirinin dijital entegrasyonu ile 4. Sanayi Devrimi ortaya çıkmıştır (Barreto, Amaral ve Pereira, 2017).

1. Sanayi Devriminin 18. yüzyılın sonlarında İngiltere'de başladığı kabul edilmektedir. Birçok itici güç ve olaydan bahsedilse de, buhar makinesinin keşfi (1764) başlangıç noktası

olarak ele alınmaktadır. 1. Sanayi Devrimi toplumda ciddi bir dönüşüm yaratmış, bireylerin tarlalardan fabrikalara göç etmesiyle birlikte toplum yapısında ciddi değişiklikler de meydana gelmiştir (Blinder, 2006). Makineleşme, verimlilik artışı, emek-yoğun üretim şekliinden sermaye-yoğun üretim tarzına geçiş, bu dönemin en belirgin sonuçları olarak görülebilir. On dokuzuncu yüzyılın ortalarında, demiryolu, telgraf, vapur ve kablo sistemleri de dâhil olmak üzere modern ulaşım ve iletişim imkânlarının ortaya çıkması, kitlesel üretim ve dağıtımını hızlandırmış, bu durum bir başka büyük değişim dalgasını başlatmıştır (Jensen, 1993). Yirminci yüzyılın başlarına kadar devam eden ve 2. Sanayi Devrimi olarak adlandırılan bu süreçte, kütle üretimi mümkün kılınmış, elektriğin üretimde kullanılması ve montaj hattının ortaya çıkışı ile dönem devam etmiştir (Schwab, 2017).

1960'larda başlayan 3. Sanayi Devrimi, yarı iletkenlerin, ana bilgisayarların, kişisel bilgisayarların ve internetin gelişmesi ile oluştuğundan dijital devrim olarak adlandırılmıştır (Schwab, 2017). Bu devrimde elektronik ve bilgi teknolojisi üretimi otomatikleştirmek için kullanılmıştır (World Economic Forum, 2016). Biyoteknoloji, amaca uygun geliştirilmiş yeni malzemeler, yarı iletkenler, elektronik perakendecilik gibi birçok kavram, bu dönemdeki gelişmeler sonucunda ortaya çıkmıştır (Thurow, 2000). Almanya'nın liderlik ettiği 4. Nesil Endüstri Devrimi (Endüstri 4.0) en basit hali ile internet teknolojilerinin üretim ortamlarına girmesidir ve Siber-fiziksel Sistem destekli üretim ve hizmet yeniliğine dayanmaktadır (Lee, Kao ve Yang, 2014). 4. Sanayi Devrimi ortaya çıkan teknolojiler ve geniş tabanlı inovasyonlar sayesinde önceki devrimlere nazaran dünyada daha hızlı yayılan ve daha derin değişimler gerçekleştiren bir durumdur (Schwab, 2017). İzleyen bölümde Endüstri 4.0 kavramı daha detaylı açıklanmıştır.

3. ENDÜSTRİ 4.0 KAVRAMI

Endüstri 4.0 terimi, Alman hükümetinin üretimin bilgisayarlaşmasını teşvik etme konusundaki yüksek teknoloji stratejisi tarafından başlatılan bir projeden kaynaklanmaktadır (Sung, 2017). Endüstri 4.0, üretim değer zincirlerini ve iş modellerini kökten değiştirecek yeni bir teknolojik çağı mümkün kılan gömülü sistem üretim teknolojilerini ve akıllı üretim süreçlerini birleştirmektedir (MacDougall, 2014). Endüstri 4.0, çeşitli şirketler, fabrikalar, tedarikçiler, lojistik, kaynaklar, müşteriler vb. arasındaki eksiksiz bir iletişim ağı anlamına gelmektedir (Carvalho, Chaim, Cazarini ve Gerolamo, 2018). Endüstri 4.0'ın değer ağları üzerinden yatay entegrasyon, tüm değer zinciri boyunca mühendisliğin uçtan uca dijital entegrasyonu, dikey entegrasyon ve ağ bağlantılı üretim sistemleri olmak üzere üç temel özelliği mevcuttur (Kagermann, Wahlster ve Helbig, 2013). Dikey ve yatay düzeydeki üretim

süreçlerinin dijital entegrasyonu ve otomasyonu, iletişimin otomasyonunu ve standart süreçlerde işbirliğini de sağlayacaktır (Erol, Jägera, Hold, Otta ve Sihn, 2016). Endüstri 4.0, işletmelere akıllı makinelerin, ürünlerin ve üretim kaynaklarının esnek üretim sistemlerine dikey entegrasyonu ve üretim kaynaklarının optimizasyonunu sağlayacak sektörler arası değer ağlarına yatay entegrasyonu için önemli bir model olarak hizmet vermektedir (Kagermann, Anderl, Gausemeier, Schuh ve Wahlster, 2016). Endüstri 4.0 dünyasında üretim tamamen sensorlar, aktüatörler ve otonom sistemler ile donatılacak (Lasi ve diğerleri, 2014) ve üretime otonom robotlar, eklemeli (additive) üretim, endüstriyel internet, simülasyon, bulut ve siber güvenlik, büyük veri, yatay dikey entegrasyon, artırılmış gerçeklik teknolojileri hâkim olacaktır (Cordes ve Stacey, 2017). Endüstri 4.0'ın dünyayı daha dijital, daha bağlı, daha esnek ve daha duyarlı hale getireceği ifade edilmektedir (Morrar, Arman ve Mousa, 2017).

Endüstri 4.0 ile birlikte makineler, veri toplayabilen, analiz edebilen ve tavsiyede bulunabilen bağımsız birer varlık haline gelecektir (Sung, 2017). Bu özellik sayesinde, düşük maliyetle daha kaliteli ürünler üretmek için daha hızlı, verimli ve esnek süreçler oluşturulabilecektir. Bu süreçler, üretim verimliliğini arttıracak, ekonomiyi değiştirecek, endüstriyel büyümeyi teşvik edecek ve sonuçta şirketlerin ve bölgelerin rekabet edebilirliğini, işgücü profilini değiştirecektir (Rüßmann, Lorenz, Gerbert, Waldner, Justus, Engel ve Harnisch, 2015).

Endüstri 4.0'ın temel bileşenleri Nesnelerin İnterneti (Internet of Things), Siber-fiziksel Sistemler (Cyber-physical Systems), Hizmetlerin İnterneti (Internet of Services) ve Akıllı Fabrika (Smart Factory) olarak tanımlanmıştır (Hermann, Pentek ve Otto, 2016). Bu bileşenlerin detayları izleyen başlıklarda yer almaktadır.

3.1. Nesnelerin İnterneti

İnternet günümüz dünyasının vazgeçilmez kavramlarından biridir. Bugün yaklaşık 1,5 milyar internet özellikli PC ve 1 milyardan fazla internet özellikli cep telefonu kullanılmakta ve şu anki “PC’lerin İnterneti”nin, 2020 yılına kadar 50-100 milyar cihazın internete bağlanacağı “Nesnelerin İnterneti”ne doğru ilerleyeceği tahmin edilmektedir (Santucci, 2010).

IERC (2014) Nesnelerin İnternetini, fiziksel ve sanal “nesnelerin” kimlikleri, fiziksel nitelikleri ve sanal kişilikleri olduğu, akıllı ara yüzleri kullandığı ve sorunsuz bir şekilde bilgi ağıyla bütünleştiği, standart ve birlikte çalışabilir iletişim protokollerine dayanan, kendi kendini yapılandırma özelliklerine sahip dinamik bir küresel ağ altyapısı olarak tanımlamaktadır. Nesnelerin İnterneti ile (bazen bitmemiş ürünler dâhil olmak üzere) daha

fazla cihaz, gömülü bilgisayarla zenginleştirilecek ve standart teknolojiler kullanılarak birbirlerine bağlanacak, böylece saha cihazlarının birbirleriyle ve merkezi kontrol cihazlarıyla iletişim kurması ve etkileşimde bulunması söz konusu olacak, bu da analitik ve karar vermeyi merkeziyetçilikten uzaklaştırarak gerçek zamanlı tepkiler verilmesini sağlayacaktır (Rüßmann ve diğerleri, 2015).

Nesnelerin İnterneti, insanların ve nesnelerin, her yerde, her zaman, her şeye ve herhangi birine, ideal olarak herhangi bir yolu/ağı ve herhangi bir hizmeti kullanarak bağlanmasını sağlar (IERC, 2014). Nesnelerin İnterneti ile ürünler radyo frekansı tanımlama kodları ile tanımlanır ve iş istasyonları, her ürün için hangi üretim adımlarının gerçekleştirilmesi gerektiğini ve belirli bir işlemi gerçekleştirmek için adapte olabileceklerini “bilirler” (Rüßmann ve diğerleri, 2015). Nesnelerin “biliyor” olması kendi kendilerini de optimize edebileceğini göstermektedir. Nesnelerin İnterneti altyapısı, farklı ama birlikte çalışabilir iletişim protokolleri kullanarak, akıllı nesnelerin (kablosuz sensorlar, mobil robotlar vb.) sensor ağ teknolojilerinin ve insanların kombinasyonlarını sağlar ve erişimi zor alanlarda (petrol platformları, mayınlar, ormanlar, tüneller, borular vb.) veya acil/tehlikeli durumlarda da (depremler, yangın, taşkınlar, radyasyon alanları vb.) kullanılacak dinamik bir ağ yapısı sağlar (Vermesan vd., 2011).

3.2. Siber-Fiziksel Sistemler

Siber-fiziksel Sistemler, işlemlerin izlenmesi, kontrolü, koordinasyonu ve bütünleştirilmesi için bilgisayar ve iletişim ağı tarafından sağlanan mühendislik sistemleridir (Rajkumar, Lee, Sha ve Stankovic, 2010). Siber-fiziksel Sistemler, gömülü sistemler, sensorlar, ağ erişimi de dâhil olmak üzere aktüatörlerin konfigürasyonunun bir sonucu olarak tanımlanabilir (Anderl, 2014).

Nesnelerin İnterneti üzerinden, Siber-fiziksel Sistemler gerçek zamanlı olarak birbirleriyle ve insanlarla iletişim kurar, insanlarla iş birliği yapar, fiziksel süreçleri izler, fiziksel dünyanın sanal bir kopyasını oluşturur ve merkezi olmayan kararlar alırlar (Hermann vd., 2016). Siber-fiziksel Sistemler, fiziksel dünya ile dijital dünyanın birleşiminden ortaya çıkmaktadır. Siber fiziksel üretim ağı, özellikle konumdan bağımsız özerk eylemler, yaygın entegrasyon, çeşitli otomatik hizmetler ve içeriğe özel olarak müşterilerin ihtiyaçlarına ve gereksinimlerine tepki gösterebilme özelliği ile karakterize edilmektedirler (Lasi vd., 2014).

Siber-fiziksel Sistemlerin uygulamada kullanıldığı birçok alan mevcuttur. Yüksek güvenilirliğe sahip tıbbi cihazlar ve sistemler, asistanlı yaşam, trafik kontrolü ve güvenliği,

gelişmiş otomotiv sistemleri, süreç kontrolü, tarım, sağlık, enerji tasarrufu, çevre kontrolü, kritik altyapı kontrolü (elektrik gücü, su kaynakları ve iletişim sistemleri gibi), savunma sistemleri, imalat ve akıllı yapılar gibi birçok alanda Siber-fiziksel Sistemlerin kullanımı mevcuttur (Lee, 2008; Rajkumar vd., 2010).

3.3. Hizmetlerin İnterneti

Hizmetlerin İnterneti, internet temelli hizmetlerin sağlanmasına yönelik yeni bir yaklaşımdır (Anderl, 2014). Hizmetler internetinin vizyonu, servis sağlayıcılarının hizmetlerini internet üzerinden sunmalarını sağlamaktır, dijitalleşmenin derecesine bağlı olarak hizmetler dünya çapında sunulabilmekte ve talep edilebilmektedir (Buxmann, Hess ve Ruggaber, 2009). Hizmetlerin İnterneti hizmet sağlayıcıların ve tüketicilerin hizmet için iş ağları oluşturduğu gelişmiş iş modelleri için teknik taban sağlamaktadır (Cardoso, Voigt ve Winkler, 2008).

3.4. Akıllı Fabrika

Siber-fiziksel Sistemlerin üretim sistemlerinde kullanılması akıllı fabrikayı meydana getirmektedir (MacDougall, 2014). Akıllı Fabrika, Siber Fiziksel Sistemler ve Nesnelerin İnterneti tanımlarına dayanarak, Siber-fiziksel Sistemlerin Nesnelerin İnterneti üzerinden iletişim kurduğu, insanlara ve makinelere görevlerini yerine getirmelerinde yardımcı olan bir fabrika olarak tanımlanabilir (Hermann vd., 2016). Akıllı fabrika, sürdürülebilir ve hizmet odaklı iş uygulamalarına göre tasarlanmıştır (MacDougall, 2014).

Endüstri 4.0'ın özelliklerinden biri olan dikey entegrasyon özelliği, son derece esnek ve yeniden yapılandırılabilir akıllı fabrika kurmak anlamına gelmektedir, bu yüzden akıllı fabrikaların, verimli ve kârlı bir şekilde özelleştirilmiş ve çok partili ürünler üretebileceği düşünülmektedir (Wang, Wan, Li ve Zhang, 2016). Akıllı fabrikalar, insanların, makinelerin ve kaynakların birbirleriyle sosyal ağlarda olduğu kadar doğal iletişim kurabilecekleri bir ortam olmaları sebebiyle karmaşıklığı yönetme yeteneğine sahiptirler, bozulmaya daha az eğilimlidirler ve ürünleri daha verimli bir şekilde üretebilirler (Kagermann vd., 2013a).

Endüstri 4.0 yeni bir kavram olduğundan, literatürdeki teknik kapsamlı çalışmalar ayrı tutulursa, genellikle kavramsal açıklamalara ve uygulama örneklerine yer veren çalışmalar bulunduğu söylenebilir. Örneğin, von Tunzelman (2003) çalışmasında teknolojik değişimlerin ve sanayi devrimlerinin organizasyonel değişim üzerindeki etkilerini işçilik, yatırım ve bilgi sistemleri açısından incelemiştir. Dutton (2014), Endüstri 4.0 teknolojilerinden biri olan Nesnelerin İnterneti üzerinde durmuş ve olası uygulama alanlarını örneklendirmiş, Jazdi

(2014) ise Endüstri 4.0'in sağlayacağı faydalardan bahsetmiş ve Siber-fiziksel Sistemler ile olan bağlantısını detaylandırmıştır, Anderl (2014), Endüstri 4.0'in temel bileşenlerini de anlattığı çalışmada, güvenlik, gizlilik ve bilgi koruma detaylarına yer vermiştir. Almada-Lobo (2015), Endüstri 4.0'in üretimde ve akıllı fabrikalarda kullanım alanlarından bahsetmiş ve üretimin akışını kolaylaştırmak, çizelgelemek, takip etmek ve bilgi toplamak için Üretim Gerçekleştirme Sistemini (Manufacturing Execution Systems) tanımlamıştır. Mario, Tobias ve Boris (2015), Endüstri 4.0 temel taşlarını ve prensiplerini, yaptıkları literatür taraması ile anlatmışlardır. Kang ve diğerleri (2016), akıllı üretimi, farklı ülkelerdeki (Almanya, ABD ve Güney Kore) uygulama alanlarını ve gerçekleştirmek için gerekli anahtar uygulamaları detaylandırmışlardır. Qin, Liu ve Grosvenor (2016), işletmeler açısından Endüstri 4.0 uygulamalarının teknolojik yol haritasının ve başarı ölçütlerinin halen belirgin olmadığını belirtmiş ve Endüstri 4.0 temel yapıtaşlarını ve üretim sistemlerinin mevcut durumunu ifade etmişlerdir. Erol ve diğerleri (2016), simülasyon tabanlı öğrenme ve öğrenen fabrika yaklaşımını birlikte kullanarak Endüstri 4.0 uygulamalını içeren örnek bir fabrika tasarımından bahsetmişlerdir. Wang ve diğerleri (2016)'nin çalışmasında, akıllı fabrika uygulamalarının teknik detayları ve bir prototip incelenmiştir.

Literatürdeki daha güncel çalışmalara bakıldığında, Santos, Mehraei, Barros, Araujo ve Ares (2017), aynı ağda bağlantılı ve gerçek zamanlı veri sağlayabilen sistemlerin endüstrilerde ciddi bir değişim oluşturacağını belirtmişlerdir. Ancak bu değişimin teknolojik sınırları, uygulama ve gelişim aşamaları henüz tam belli olmadığından, bu teknolojik değişimin işletmeler tarafından uygulanma sıkıntısı bulunmaktadır. Çalışmada, Avrupa Birliği tarafından yayınlanan yol haritaları incelenmiştir. Özsoylu (2017) tarafından yapılan çalışmada Endüstri 4.0'ın hayata geçirilmesi için gerekli olan altyapıdan, yaşanabilecek sorunlardan, Endüstri 4.0'ın özelliklerinden ve bileşenlerinden bahsedilmiştir. Pereira ve Romero (2017) Endüstri 4.0'ın temel yapı taşlarını açıkladıktan sonra, işletmeler üzerindeki etkilerini özellikle ürünler ve hizmetler, iş ortamı ve gerekli yetenekler açısından özetlemişlerdir. Aksoy (2017) tarafından Endüstri 4.0 konusu teknoloji kavramı açısından ele alınmıştır. Endüstri 4.0 kapitalizm üzerinden açıklanmaya çalışılmış, Endüstri 4.0 dönemi “sermayenin geri dönüşünü hızlandıracak yeni bir evre” olarak tanımlanmıştır (Aksoy, 2017). Hofmann ve Rüşch (2017) Endüstri 4.0 temellerini ve teknolojileri tanımlamış, JIT sistemlerindeki potansiyel uygulamalardan, üretim planlama, üretim sıralama, tedarikçideki üretim ve teslimat adımlarını detaylandırarak bahsetmişlerdir. Ovacı (2017) tarafından yapılan çalışmada ise açık inovasyon konuları, Endüstri 4.0 kavramı ve bunun inovasyon

paradigmasına etkileri detaylı olarak ele alınarak inovasyon sürecindeki değişim incelenmiştir. Soylu (2017) tarafından yapılan çalışmada, Endüstri 4.0 kavramı ele alınmış, Endüstri 4.0 kavramının girişimcilik üzerindeki etkileri, yeni girişimcilik modellerinin nasıl olabileceği incelenmiştir. Barreto ve diğerleri (2017) Endüstri 4.0 teknolojilerine değindikten sonra, lojistik sürecinde Endüstri 4.0 kullanımı ile ilgilenmişler, uyumlaştırma ve bütünleştirme için gerekenleri sıralamışlardır. Benzer şekilde Witkowski (2017), Nesnelerin İnterneti, büyük veri gibi Endüstri 4.0 kapsamında ele alınan yeniliklerin lojistik sektöründeki etkisini belirtmişlerdir. Genç (2018), tarafından yapılan çalışmada, Endüstri 4.0 devriminin Türkiye ekonomisi üzerindeki olabilecek etkileri, ülkenin devrimi yakalayabilmesi için olası tehditlerin üstesinden nasıl gelebileceğine ilişkin önerilere yer verilmiştir. Vaidya, Ambad ve Bhosle (2018), kitlesel üretimden kişisel üretime geçişte verimliliği artırma çabasında Endüstri 4.0'ın yeri, önemi ve teknolojilerinden bahsetmişlerdir. Pamuk ve Soysal (2018) tarafından yapılan çalışmada, Endüstri 4.0 konusu ele alınmış, uygulamada Endüstri 4.0'ın nasıl kullanıldığına değinilmiş, literatürde Endüstri 4.0 üzerine yapılan çalışmalar literatür taraması yapılarak sunulmuştur. Dossou (2018), KOBİ'lerin Endüstri 4.0 ve tedarik zinciri 4.0 kavramlarını gerçekleştirmelerinin oldukça zor olduğunu ifade etmiştir. Teknolojik, dijital, sosyal ve çevresel boyutların bütünleştirilmesini de içeren, sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir tedarik zincirleri için bir referans model geliştirmiştir. Bağcı (2018) tarafından yapılan çalışmada, Endüstri 4.0 konusu ele alınmış, Endüstri 4.0'ın etkileri, zorlukları, dünya ülkelerinin devrime yönelik yapmış oldukları hazırlıklar, devrimin yararları ve ihtiyaçları ele alınmıştır. Akben ve Avşar (2018) tarafından yapılan çalışmada, Endüstri 4.0 ve karanlık üretim konuları ele alınmıştır. Alcacer ve Cruz-Machado (2019) çalışmalarında Endüstri 4.0 teknolojilerini özetlemişlerdir. Endüstri 4.0 teknolojileri ile ulaşılabilecek noktaya dair bir değerlendirmede bulunmuş ve halen teori ile mevcut üretim sistemleri arasında ciddi bir farklılık olduğunu belirtmişlerdir.

4. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI

Dünyanın en büyük sorunu sahip olduğu kıt kaynakları ile hızla artan insan sayısının istek ve ihtiyaçlarını karşılamak zorunda olmasıdır. Endüstriyel gelişimi yakalamayı başaran ülkelerde verimlilik artışı, ekonomik büyüme, yüksek kalitede mal ve hizmetlerin sunulması, toplumun refah düzeyinin artması şeklinde sonuçlar alınmış, ancak toplumun geleceğini göz ardı eden bu hızlı gelişim dünya kaynaklarının tüketilmesi ve iklim değişikliği gibi küresel boyutta birçok sorunu da beraberinde getirmiştir. Bu sorunlar, sürdürülebilirlik kavramını

ortaya çıkarmış ve bu kavramı çözüm önerisi olarak tüm dünyanın odağı haline getirmiştir (Morrar vd., 2017).

Sürdürülebilirlik kavramı ile ilgili birçok tanım bulunmaktadır. En çok kabul gören tanım, 1987 yılında Birleşmiş Milletler tarafından yayınlanan Ortak Geleceğimiz raporunda yer alan tanımdır: Sürdürülebilir kalkınma, günümüz ihtiyaçlarının, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama kabiliyetinden ödün vermeksizin karşılanmasıdır (UN, 1987). Ehrenfeld (2005) sürdürülebilirliği “tüm yaşam biçimlerinin sonsuza dek gelişeceği ihtimali” olarak ifade ederken, White (2013) sürdürülebilirliği “geleceğin vizyonu” olarak tanımlamış, sürdürülebilirliğin bireylerin ve kuruluşların ortak bir vizyona ulaşmalarına yardımcı olabileceğini belirtmiştir. Sürdürülebilirlik, “çevresel ve sosyal koşulların insan türünün güvenliği, refahı ve sağlığını destekleyebilmesi şansını maksimize edebilmek için, yaşam tarzımızı dönüştürmek” anlamına gelmektedir (McMichael, Butler ve Folke, 2003). Choi ve Ng (2011) ise sürdürülebilirliği insan yaşamını, faaliyetlerini ve ekosistemi desteklemek için kişisel/toplumsal ihtiyaçlar ile doğanın kapasitesi arasında denge bulma sorunu olarak tanımlamıştır.

Sürdürülebilirliğin, ekonomik, sosyal ve çevresel olmak üzere üç boyutu mevcuttur. Çevresel boyut, tüketimden kaynaklanan çevresel değişimin, sağlık ve insan refahı üzerindeki etkisiyle ilgilidir (Sheth, Sethia ve Srinivas, 2011). Bu boyut, doğal sermayenin korunmasına, yenilenebilir ve yenilenemez doğal kaynakların kullanımı, kirlenme ve atık bertarafı faaliyetlerine odaklanmaktadır (Goodland, 1995). Sürdürülebilirliğin ekonomik boyutu borç yükü, kazanç baskısı ve iş-yaşam dengesi gibi oluşturduğu finansal unsurlar açısından tüketimin, toplumun ekonomik refahı üzerindeki etkisiyle ilgilidir. Sürdürülebilirliğin sosyal boyutu tüketimin, kişisel refah üzerindeki etkisi ile ilişkilidir; bireyin, ailesinin veya toplumun refahını ve yaşamın kalitesini ifade etmektedir ve eşitlik, güvenlik, eğitim, sağlık, kültürel kimlik vb. alt başlıkları inceler (Soubotina, 2004; Sheth vd., 2011).

Doğal kaynakların sürdürülebilirliği ile dünya yaşanabilecek bir yer olmaya devam edecektir. Sadece bireylerin değil, kurumların, devletlerin ve işletmelerin de dünyanın yaşanabilir bir yer olmasını sağlayabilmek için sürdürülebilirliğe katkıda bulunması gerekmektedir. Bu sebeple sürdürülebilirlik, özellikle çevresel boyutuyla, işletmeler için de önemli bir kavram haline gelmiştir.

Literatürde sürdürülebilirlik, sürdürülebilirliğin farklı boyutları ve işletmeler açısından ele alınmasıyla ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Sürdürülebilirliğin önemli bir kavram

olarak algılanması ve birçok disiplin ve konu ile bağlantı içinde olması, hemen her alanda kullanılan bir kavram haline gelmesine de sebep olmuştur. Sürdürülebilir kalkınma, sürdürülebilir tüketim, sürdürülebilir tarım, sürdürülebilir yönetim, sürdürülebilir üretim gibi farklı kavramlara sıklıkla rastlanmaktadır. Bu çalışma sürdürülebilirliğe işletmeler açısından yaklaşığından ve sürdürülebilir üretim konusuna odaklandığından izleyen bölümlerde bu kapsamdaki alt başlıklar incelenmektedir.

5. SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM

1992 yılında ilk olarak Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda ortaya çıkan sürdürülebilir üretim kavramı, sürdürülebilir kalkınmanın kilit bileşenlerinden biridir (Krajnc ve Glavič, 2003). Tablo 1'de gösterildiği gibi üretim paradigmasının evrim sürecinde şimdilik son aşamada kabul edilen sürdürülebilir üretim (Jovane, Koren ve Boer, 2003) için tıpkı sürdürülebilirlik kavramında olduğu gibi birçok tanım bulunmaktadır, bunların bazıları birbirlerini tamamlamakta, bazıları birbiri ile örtüşmektedir (Millar ve Russell, 2011).

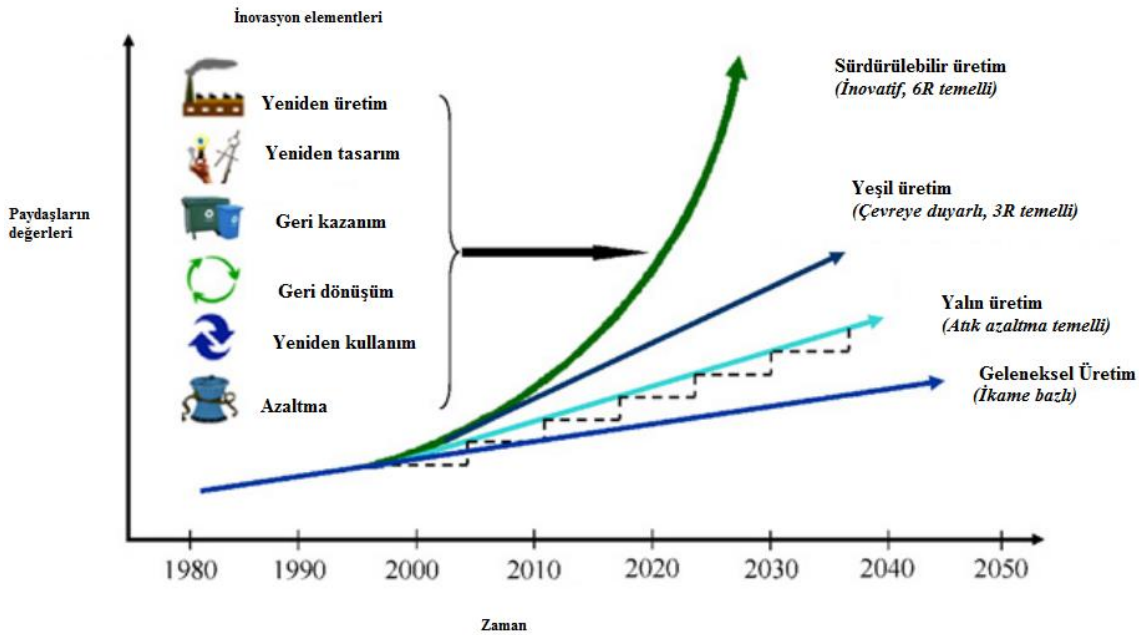
Tablo 1. Üretim Paradigmasının Evrimi

Paradigma	Zanaatkârlığa dayalı üretim	Kitle Üretimi	Esnek Üretim	Kitle Özelleştirme ve Kişiselleştirme	Sürdürülebilir Üretim
Başlangıcı	~1850	1913	~1980	2000	2020-?
Toplum ihtiyacı	Kişiyeye özel ürünler	Düşük maliyetli ürünler	Ürün çeşitliliği	Kişiyeye özel ürünler	Temiz ürünler
Pazar	Ürün başına oldukça küçük	Talep>Arz Sürekli talep	Arz>Talep Ürün başına küçük hacimlerde	Küreselleşme Dalgah talep	Çevre
İş modeli	Çekme Sat-Tasarla-Üret-Montaj	İtme Tasarla-Üret-Montaj-Sat	Çekme-İtme Tasarla-Üret-Sat-Montaj	Çekme Tasarla-Sat-Üret-Montaj	Çekme Çevre için tasarla-Sat-Üret-Montaj
Teknoloji sağlayıcı	Elektrik	Değiştirilebilir parçalar	Bilgisayarlar	Bilgi teknolojisi	Nano/ Bio/ Malzeme Teknolojisi
Süreç sağlayıcı	Takım tezgâhları	Hareketli montaj hatları ve özel işleme hatları	Esnek Robotlar	Yeniden yapılandırılabilir üretim sistemleri	Üretimde artış

Kaynak: Jovane ve diğerleri (2003)

Lowell Center for Sustainable Production (1998) tarafından sürdürülebilir üretim, ürünlerin ve hizmetlerin, çevreyi kirletmeyen, enerjiyi ve doğal kaynakları koruyan, ekonomik, çalışanlar, toplum ve nihai tüketiciler için güvenilir, çalışanlar için sosyal ve yaratıcı olarak ödüllendirici süreçleri ve sistemleri kullanarak üretilmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Sürdürülebilirliğin tanımına paralel olarak sürdürülebilir üretim,

gelecekteki nesillerin ihtiyaç ve isteklerini karşılayabilme yeteneğinden ödün vermeden, mevcut toplumun ihtiyaç ve isteklerini karşılayan ürünlerle sonuçlanan endüstriyel faaliyet olarak da ifade edilmektedir (de Ron, 1998). Sürdürülebilir üretim yeşil tasarım, çevre dostu malzeme kullanımı ve üretim süreçlerinin optimizasyonu yoluyla kaynak verimliliğini artıran ve çevreye zararlı madde emisyonunu azaltan üretim sistemleri geliştirmek olarak açıklanmaktadır (Kang vd., 2016). Bu kapsamda her türlü atığın ve hammadde ve enerji kaynaklarının kullanımını en aza indirmek amaçtır (de Ron, 1998). Sürdürülebilir üretim sisteminde, hammaddelerin temininden ürünün tasarımına hatta ürünün geri dönüşümüne kadar olan tüm aşamalarda sürdürülebilirliğin sağlanması amaçlanmakta ve işletmelerin sürdürülebilirliği sağlayabilmeleri için ürün zinciri temel faaliyetlerini (ürün tasarımı, hammadde edinimi, lojistik, üretim, satış dağıtım, kullanım, ürün ömrü sonu işlemleri ve atıklar gibi) optimize etmeleri gerekmektedir (de Ron, 1998). Bu faaliyetler sırasında da çevre odaklı, temiz veya yeşil üretim olarak adlandırılan stratejiler uygulanmaktadır. Nitekim sürdürülebilir üretimin tarihçesine bakıldığında (Şekil 1) geleneksel üretimden atık azaltma temelli yalın üretime, daha sonra yeşil üretime ve günümüzün üretim yaklaşımı olan sürdürülebilir üretime ulaşıldığı görülmektedir (Jayal, Badurdeen, Dillon ve Jawahir, 2010).



Şekil 1. Sürdürülebilir Üretimin Tarihçesi

Kaynak: Jayal ve diğerleri (2010)

Literatürde sürdürülebilir üretim ile ilgili çalışmalara bakıldığında, 2000'ler öncesindeki yayınında de Ron (1998), çevreye duyarlı ürün tasarımı, üretim, paydaşlar,

performans ölçütleri gibi konularda bilgi vermiş ve ürün tasarımı, malzeme geri kazanımı, üretim süreci gibi çevresel sürdürülebilirliğe dikkat eden işletmelerin azalan maliyetler, iyileşen kalite ve daha iyi süreç yönetimi sayesinde rekabet avantajı ve pazar payı sağlayacağını belirtmiştir. Gavrilescu (2004), temiz üretimin sürdürülebilir kalkınma ile ilişkisine değinmiş ve işletmelerde uygulanabilmesi için yeni bir düşünme şekli ve davranış yapısı gerektirdiğini belirtmiştir. Benzer şekilde Garetti ve Taisch (2012) çalışmalarında tüm üretim modellerinin geleneksel yaklaşıma sahip olduğunu, ancak sürdürülebilir üretim için yeni çözümler bulunması gerektiğini belirtmişlerdir. Yazarlara göre, bunun için yeni teknoloji, yeni işletme modelleri ve yeni yaşam şekli modellerine ihtiyaç bulunmaktadır. Yavuz (2010) çalışmasında, sürdürülebilirlik kavramı ve işletmeler için sürdürülebilir üretim stratejileri konularını ele almıştır. Aracıoğlu (2010), üretim yönetimi konusunda geçmişten günümüze kadar olan değişimi incelemiş ve sürdürülebilir üretim konusunu detaylandırmıştır. Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı (2011) tarafından yapılan çalışmada, sürdürülebilir üretim konusu ve işletmelerde uygulanması sürecinin nasıl gerçekleştirilebileceği ele alınmıştır. Despeisse, Mbaye, Ball ve Levers (2012), işletmelerde uygulanan sürdürülebilirlik çabalarına ve projelerine değinen çalışmaların literatür özetini çıkarmışlardır. Jawahir ve Bradley (2016), çevresel açıdan sürdürülebilir üretiminin günümüz lineer ekonomiden farklı olarak oluşturduğu döngüsel ekonomiyi (circular economy), 6R temeli ile açıklamışlardır. Jayal ve diğerleri (2010)'nin çalışmasında sürdürülebilir üretimi her üç açıdan da ele alınmış, üretim-öncesi, üretim, kullanım ve kullanım-sonrası olarak detaylandırılmış, ürün ve süreç için sürdürülebilirlik indeksi oluşturulmuştur. Chiarini (2014), üretim sürecinin çevresel etkilerinden bahsetmiş ve yalın üretim uygulamalarının bu etkileri azaltma üzerindeki etkilerini incelemiştir. Alayon, Safsten ve Johansson (2017), literatürdeki kavramsal sürdürülebilir üretim prensipleri ile uygulamada geçerli olan ölçütler arasında bir boşluk olduğunu ifade etmiş ve durumu değerlendirmek adına işletmelerle görüşmeler yaparak teorik prensiplerin işletmelerde nasıl uygulandığını araştırmışlardır.

Çevreye duyarlı üretim söz konusu olduğunda, geleneksel olarak 3R (azaltma-reduce, yeniden kullanma-reuse ve geri dönüşüm-recycle) stratejisinden bahsedilebilir (Nakıboğlu, 2014). Bu stratejiler sayesinde üretim sürecinin daha az kaynak tüketmesi ve daha az kirlilik ortaya çıkarması beklenir (Sarkis ve Rasheed, 1995). Bu üç stratejinin kullanım oranı da, bir üretim sürecinin ne kadar çevreye duyarlı olduğunun göstergesi olarak kabul edilebilir. Bu kavramlara ürün kazanımı (recover), yeniden tasarım (redesign), yeniden üretim (remanufacturing) stratejileri de eklenerek, 6R yaklaşımı elde edilir. Bu yaklaşım, daha

kapsamlı olarak birden çok ürün döngüsünü dikkate alır, kapalı-çevrimli ve inovatif bir yaklaşım olarak görülür ve üretim öncesi, üretim, kullanım ve kullanım sonrası süreçlerinin tamamını dikkate alır (Jawahir, Dillon, Rouch, Joshi, Venkatachalam ve Jaafar, 2006). 6R metodolojisinin kısaca açıklaması aşağıdaki şekildedir:

Azaltma (reduce), temel olarak ürün yaşam döngüsünün ilk üç aşamasına odaklanır ve üretim öncesinde kaynak kullanımının azaltılması, üretim sırasında enerji ve malzemelerin kullanımının azaltılması ve kullanım aşamasında atıkların azaltılması anlamına gelir (Jawahir ve Bradley, 2016). Bu yaklaşım günümüzde, üretim işletmelerine maliyet tasarrufu, çevre mevzuatının yerine getirilmesi sayesinde iyi bir üne sahip olmak, tüketici algısının yeşil ürünlere olan değişimlerine uyum sağlamak gibi avantajlar sağlamaktadır (Shrouf ve Miragliotta, 2015).

Yeniden kullanım (reuse), ürünün bir bütün olarak veya bileşenlerinin yeniden kullanımını, yeni ürün ve bileşen üretiminde malzeme kullanımının azalmasını sağlar (Jawahir ve Bradley, 2016).

Geri dönüşüm (recycle), daha önce kullanılmış ve atık olarak kabul edilecek malzemenin yeni bir ürün üretebilmek amacı ile geri kazanılmasıdır (Zhang, Kuo, Lu ve Huang, 1997).

Geri kazanım (recover), ürünün kullanım ömrünün sonunda toplanması, ürünün sonraki yaşam döngülerinde kullanım için parçalarına ayrılması/demontajı, ayrıştırılması/sınıflandırılması ve temizlenmesi işlemidir (Jawahir ve diğerleri, 2006; Jawahir ve Bradley, 2016).

Yeniden tasarım (redesign), gelecekte kullanım-sonrası süreçleri kolaylaştırmak için ürünün yeniden tasarlanmasıdır ve azaltma (reduce) çabası ile birlikte anılmaktadır (Jawahir vd., 2006).

Yeniden üretim (remanufacturing), kullanılmış ve tedarik zincirinde geri dönmüş bir ürünün tüm bileşenlerinin çıkartılması ve kontrolü sonrasında bazı parçalarının tamir ve elden geçirme sayesinde yeniden kullanılması, bazı parçaların yenileri ile değiştirilmesi ve montaj sonrasında kalite, özellikler ve performans açısından “yenisi kadar iyi” olan ürün üretilmesi sürecidir (Nakıboğlu, 2014).

Yukarıda bahsedilen sürdürülebilir üretim uygulamalarının yaygınlaşabilmesi için aşağıda bahsedildiği gibi bazı önemli değişimlerin yerine getirilmesi gerekmektedir (Despeisse, Mbaye, Ball ve Levers, 2012):

- Malzeme ve enerji gibi doğal kaynakların verimliliğini artırarak daha az tüketmek.
- İstenmeyen çıktıların azaltılması veya çıktılarının yeniden girdi olarak kullanılması gibi doğadan esinlenilmiş üretim modellerine geçmek, örneğin geri dönüşüm ve türevleri, daha temiz üretim ve endüstriyel simbiyosis.
- Sahiplik ve üretim yapısındaki değişimleri gerçekleştirmek, ürün-hizmet sistemleri gibi çözüm odaklı iş modellerine geçmek.
- Girdilerin ikamesi sayesinde doğal kaynakların yeniden yapılandırılmasını sağlamak, örneğin toksik maddeler yerine toksik olmayan maddeler, yenilenemez enerji kaynakları kullanımı yerine yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı gibi değişimlerin gerçekleştirilmesi sağlanmalıdır.

Herrmann, Schmidt, Kurle, Blume ve Thiede (2014) tarafından yapılan çalışmada gelecekte üretimin, sürdürülebilirliğin üç boyutunu da ele alması gerektiği belirtilmiştir. Ekonomik boyut açısından bakıldığında üretimde yüksek kârlılık hedeflenmeli; çevresel boyut açısından üretimin çevresel etkileri azaltılmalı, sıfır emisyonu yönlendirilmeli, hatta fabrikanın yerel çevresi üzerinde olumlu bir etki yaratılmalı, hava ve su kalitesi iyileştirilmeli, fabrikalar yenilenebilir enerji sağlama ve artık enerji için depolama görevi görmeli, sosyal boyut açısından; fabrika işbirlikçi öğrenmeye ve insan kapasitelerinin geliştirilmesine odaklanarak insanlar için hizmet vermelidir (Hermann vd., 2014). Önceki bölümde bahsedilen Endüstri 4.0 uygulamalarının üretimde kullanılmasıyla üretim verimliliğinin ve ürün kalitesinin artırılması sürdürülebilirliğin ekonomik boyutuna; malzeme ve enerji kullanım miktarlarının takip edilmesiyle sürdürülebilirliğin çevresel boyutuna; güvenli bir çalışma ortamı sunulması, daha az iş yükü ve iş zenginleştirilmesi ile sosyal boyutuna katkıları olacağı belirtilmektedir (Braccini ve Margherita, 2019).

6. ENDÜSTRİ 4.0 VE SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM

Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik, mevcut üretim sistemindeki ana eğilimler ve üretim/tüketim modellerini yeniden şekillendiren sanayi dalgaları olarak kabul edilmektedirler (de Sousa Jabbour, Jabbour, Foropon ve Filho, 2018). Yukarıda daha detaylı bahsedildiği gibi, tüm yaşam döngüsünde ürünün sürdürülebilir olabilmesi için çevreye duyarlı tasarım, çevreye etkisi az malzemelerin seçimi, daha az malzeme kullanımı, üretim tekniklerinin optimizasyonu, dağıtım sistemlerinin optimizasyonu, kullanım esnasındaki etkilerin azaltılması, ürün yaşamının optimizasyonu ve yaşam sonunun optimizasyonu stratejilerin yerine getirilmesi gerekmektedir (Gavrilescu, 2004).

Literatürde birçok çalışma, teknolojinin çevresel sorunların hem sebebi hem de çaresi olduğunu, ancak çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında kritik faktör olduğunu savunmaktadır (Garetti ve Taisch, 2012; Franciosi, Iung, Miranda ve Riemma, 2018). Dolayısıyla Endüstri 4.0 kavramına paralel olarak gelişen teknolojilerin işletmelerin tasarım, üretim, lojistik gibi süreçlerinde sürdürülebilirliği sağlamak adına kullanılabilmesi görülmektedir (Brito, Ramos, Carneiro ve Gonçaves, 2019). Erol (2016) çalışmasında, Endüstri 4.0'ın tam anlamıyla sürdürülebilir üretim ortamları oluşturmada son şans olabileceğini öngörmektedir.

Endüstri 4.0 kavram ve teknolojilerinin sürdürülebilirlik ve daha detayda sürdürülebilir üretim üzerindeki etkisini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Shrouf ve Miragliotta (2015) Nesnelerin İnterneti ile sağlanabilecek enerji etkin üretim yönetimi uygulamalarını, literatür araştırması ve uzmanlar ile görüşmeler sonucu ortaya koymuşlar, akıllı sensorlar ve akıllı sayaçlar sayesinde enerji kazanımı sağlayabileceğinden bahsetmişlerdir. Stock ve Seliger (2016) Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirliğe sağlayabileceği faydaları değer katma bakış açısıyla özetlemişler, mikro ve makro açıdan faydalarına odaklanmışlardır. Gabriel ve Pessl (2016) ise çalışmasında Endüstri 4.0'ı tanımlamış ve sosyal ve çevresel açıdan sürdürülebilirlik ile ilişkisini detaylandırmıştır. de Man ve Strandhagen (2017) çalışmalarında sürdürülebilirlik üzerinde durulmuş ve bazı ürünlerin Endüstri 4.0 yaklaşımlarının da yardımıyla nasıl daha sürdürülebilir yapılabileceği hakkında örnekler verilmiştir. Örneğin, dizüstü bilgisayarın bulut ulaşımı sayesinde güncellenebilmesi, dolayısıyla değiştirilmeye gerek kalmaması veya kıyafetlerin satın alınması yerine kiralanması ve bunun için müşteri davranışlarını takip eden dijital portalların kullanılmasıyla ürünlerin sürdürülebilirliğinin sağlanabileceğini ifade etmişlerdir. Kiel, Muller, Arnold ve Voigh (2017), Nesnelerin İnterneti'ni, ekonomik, ekolojik ve sosyal sürdürülebilirlik açısından inceleyebilmek için işletmelerle yaptıkları görüşmelerde, rekabetçilik, kaynak etkinliği, daha kısa işlem süreleri gibi faydalar sağlanırken, teknik bütünleşme, organizasyonel kültürün uygunlaşması gibi konularda daha fazla çalışılmasına gerek olduğu sonucu çıkmıştır. Song ve Moon (2017) yeni siber üretim sistemlerinin kaynak ve yeterliliklerin dijitalleştirilmesi, fiziksel kaynakların bütünleştirilmesi ve birbirlerine bağlı hale getirilmesi sayesinde zeki olması sebebiyle sürdürülebilirlik konusunda geleneksel sistemlere kıyasla üstünlükleri olduğunu ifade etmişler ve üretim sistemindeki yapıyı, fonksiyonları ve sürdürülebilirlik ölçümlerini tanımlamışlardır. Kamble, Gunesakaran ve Gwankar (2018) sürdürülebilir Endüstri 4.0 konusunda teknolojiler, süreç entegrasyonu ve

çıktılar konusuna odaklı kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirmişlerdir. Öksüz, Öner ve Öner (2017) tarafından yapılan çalışmada, Endüstri 4.0 ve yalın üretim konuları ele alınmıştır. De Sousa Jabbour ve diğerleri (2018) Endüstri 4.0 ve çevresel açıdan sürdürülebilir üretim sistemlerinin birlikte uygulandığı durumlar için kritik başarı faktörlerine değinmiş ve bir yapı önermişlerdir. Toker (2018) çalışmasında Endüstri 4.0 kavramını sürdürülebilirlik açısından ele almıştır. Endüstri 4.0 kavramı incelenmiş, kavramın sürdürülebilirliğin boyutlarına (çevre, toplum ve ekonomi) etkilerinin genel olarak neler olabileceği üzerinde durulmuştur. Franciosi ve diğerleri (2018), sistemin çevresel etkisini, yaşam döngüsü maliyetini azaltması ve ekipman ulaşılabilirliği, güvenilirliği ve emniyeti iyileştirmesi açılarından önemli olan sürdürülebilirlik için bakım konusunu Endüstri 4.0 kapsamında incelemiş ve bir literatür taraması gerçekleştirmişlerdir. Carvalho ve diğerleri (2018) Endüstri 4.0'ın, sürdürülebilir üretim sistemleri üzerindeki etkilerini (örneğin daha uzun ürün yaşam döngüleri sağlaması gibi) ve siber-fiziksel sistemlerin kullanımını açıklamışlardır. Yıldız (2018) tarafından yapılan çalışmada, Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar konusu ele alınmıştır. Kayıkcı (2018) sürdürülebilirliğin sadece üretimle değil, tüm tedarik zinciri süreçleri ile birlikte olabileceğini ifade etmiş ve Endüstri 4.0'ın lojistikte sürdürülebilirlik üzerinde durmuştur. Genel olarak Endüstri 4.0'ın yenilenemez kaynak kullanımı, enerji tüketimi, CO₂ emisyonu, hava, su ve gürültü kirliliği gibi konularda iyileşme sağlayacağı ortaya çıkmaktadır. Chaim, Muschard, Cazarini ve Rozenfeld (2018) Endüstri 4.0'ın tasarım prensiplerinin, uygulamaların ve üretim üzerindeki etkilerinin, sürdürülebilirlik ile ilgili farklı stratejilerin nasıl uygulanabileceğini öğretmek yani teori ve pratik arasındaki farklılığın giderilebilmesi amacıyla işletmelerde de eğitim amacıyla uygulanabilecek sanal bir öğrenme sistemi önermişlerdir. Stock, Obenaus, Kunz ve Kohl (2018) tarafından yapılan çalışmada literatür tarama ve uzman görüşleri ile, Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir değer oluşturmadaki etkisine odaklanılmıştır. Endüstri 4.0 teknolojileri açıklanmış, ardından her üç açıdan sürdürülebilirlik incelenmiştir. Mikro ve makro açıdan olası etkiler ele alınmıştır. Müller, Kiel ve Voigt (2018) kurdukları araştırma modelinde, sürdürülebilirlik konusunda Endüstri 4.0'ın sağlayacağı fırsatları ve Endüstri 4.0'ın uygulanması sonucunda meydana gelebilecek zorlukları, işletme büyüklüğü, sektör gibi farklılıklar açısından işletmeler üzerinde istatistiksel olarak analiz etmişlerdir. Manavalan ve Jayakrishna (2019) ise çalışmalarında tedarik zinciri yönetiminde, özellikle de yeşil tedarik zincirinde Endüstri 4.0 teknolojilerinin yerine değinerek motivasyon faktörlerini ve etkileyebileceği alanları özetlemişlerdir.

İzleyen bölümlerde, Endüstri 4.0.'ın sürdürülebilir üretimde nasıl kullanılabileceğinden ve olumlu ve olumsuz yöndeki etkilerinden bahsedilmiştir.

6.1. Endüstri 4.0'ın Sürdürülebilir Üretim Üzerindeki Etkileri

Endüstri 4.0'ın dünya üzerinde olumlu ve olumsuz birçok etkisinin olacağı aşıkardır. Devrimden beklenen olumlu yönlerin daha çok olmasıdır. Nitekim yapılan çalışmalar da, iyi yönetildiği sürece, olumlu yönlerin ağır basacağı yönündedir. Stock ve Seliger (2016) ve Müller ve diğerleri (2018) Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir üretimde kullanım alanlarını, etki ve faydalarını şu şekilde özetlemişlerdir:

- Tüm tedarik zinciri boyunca sağlayacağı veri şeffaflığı sayesinde yanlış teslimat sayısı, gereksiz bekleme süreleri azaltılabilecektir.
- Üretimde kullanılan ekipmanların sensor ve aktüatörlerle güçlendirilmesi, ekipmanların kullanım alanını genişletebilecek bu sayede sürdürülebilirliğe katkı sağlanabilecektir.
- Talep ve süreç izlenebilirliği sayesinde işlerin ve süreçlerin çizelgelenmesi işlemi daha rahat olacaktır. Bu sayede üretim yükü dengelenebilecek ve enerji tüketimi azaltılabilecektir.
- Daha iyi süreç simülasyonu ve akıllı enerji sistemleri sayesinde, enerji tüketimi tahmin edilebilecektir.
- Akıllı fabrikalarda, örneğin Siber-fiziksel Sistemlerle ürünlerin, malzemelerin, enerjinin ve suyun, kaynakların dinamik kısıtlarını dikkate alarak verimli bir şekilde tahsisi sağlanabilecektir.
- Ürünlerin sürdürülebilir tasarım ile ürünün yeniden kullanılmasını ve yeniden üretilmesini sağlayarak ürünler için kapalı yaşam döngülerinin gerçekleştirilmesine odaklama imkânı sağlanabilecektir.
- Tasarımdan ürün kullanımına kadar olan veri ulaşımı sayesinde üretim tasarımı iyileştirilebilecek, ürün yaşam döngüsü geliştirilebilecektir.
- Eklemeli üretim gibi yeni üretim teknolojileri sayesinde üretim ve lojistik süreçlerinde atıklar ve israflar azaltılabilecektir.
- Atık azaltımı ve kaynak azaltımı sağlanabilecektir.
- Lojistik alanında, gereksiz malzeme akışları ve taşımalar azaltılabilecektir.
- Yukarıda bahsedilenler, sera gazı salınımını da azaltacaktır.

Endüstri 4.0 teknolojilerinin üretimde kullanımında olası sonuçlar Tablo 2’de özetlenmektedir.

Tablo 2. Endüstri 4.0’ın Temel Teknolojileri ve Çevresel Sürdürülebilirlik Üzerine Etkileri

Endüstri 4.0 bileşeni	Fırsatlar	Akış üzerinde etkisi
Akıllı üretim: -Nesnelerin İnterneti ve Siber-fiziksel Sistemlerin birleştirilmesi -Gerçek zamanlı veri kontrolü	Dikey entegrasyon	Malzeme akışında güvenilir veriye ulaşabilme imkânı Enerji akışında güvenilir veriye ulaşabilme imkânı
	Yatay entegrasyon	Yaşam döngüsü boyunca malzeme tüketimi hakkında güvenilir veriye ulaşabilme imkânı Yaşam döngüsü boyunca enerji tüketimi hakkında güvenilir veriye ulaşabilme imkânı
	Tüketicilerden veri toplama	Objektif veriye ulaşabilme imkânı
	Büyük Veri Analizi	Malzeme tüketimi optimizasyonu/eko-verimlilik Enerji tüketimi optimizasyonu/eko-verimlilik Önleyici bakım/ uzaktan bakım
Eklemeli Üretim	Prototip üretimi	Atık azaltımı
	Takım ve kalıp üretimi	Malzeme akışında azalma
	Bitmiş ürün üretimi	Atık azaltımı
	Parça üretimi	Kesme sıvısı ve dövme kayganlaştırıcıları içermez Enerji akışını artırma
	Talep üzerine üretim ve müşteri talebine özgü üretim (kişiselleştirme)	Ürünlerin istenmeyen işlevselliklerinin ortadan kaldırılması Bozucu iş modeli / işlevsellik ve hizmetler
Akıllı iletişim/ Blockchain teknolojisi	Şeffaflık/ merkezileştirmeme/ güvenilir bilgi	Enerji akışını artırma

Kaynak: Bonilla, Silva, da Silva, Gonçalves ve Sacomano (2018)

Endüstri 4.0 kavramı dünyanın gelişmelerini büyük bir heyecanla izlediği bir süreç olsa da teknolojiye yön veren ülkelerin teknolojiyi satın alan ülkeler üzerindeki etkilerinin arttığı ve bu etkilerin olumsuz sonuçlarının da olabileceği düşünülmektedir. Örneğin robotların kullanım hakkını satın almış olmanız robotu tamamen kendi istekleriniz için yönetebileceğiniz anlamına (henüz) gelmemektedir. Gelişmiş ülkeler tarafından geliştirilen teknoloji gelişmekte olan veya az gelişmiş ülkelerde bu teknolojiye kullanma isteği, gelecek zamanda robotlar üzerinden ülkeler üzerinde hâkimiyet kurmaya doğru gidebilecektir. Bakış açısına göre olumlu veya olumsuz olarak değişmekle birlikte ucuz iş gücünün olması sebebiyle üretimin yapıldığı ülkelere robot vb. teknolojiler sayesinde üretimlerin, fikirlerin asıl doğduğu ülkelere geri götürülmesi de mümkün olabilecektir (Toker, 2018). Bu durum devrimin gelişmesine yön veren ülkeler açısından olumlu bir gelişme iken mevcut üretimin

yapıldığı ülkeler için ekonomik açıdan önemli bir kayıp olarak geri dönecektir. Endüstri 4.0'ın meydana getirdiği zorluklar, sürdürülebilir üretim için de geçerli olacaktır. Dolayısıyla, bu zorlukları ve dezavantajları (Moktadir, Ali, Kusi-Sarpong ve Shaikh, 2018),

- Endüstri 4.0 teknolojilerinin yatırım maliyetlerinin yüksekliği,
- Veri güvenliğinin sağlanması gerekliliği,
- Yeterli teknolojik altyapının henüz mevcut olmaması,
- İnsan kaynaklarının bu gelişmelere henüz hazır olmaması,
- İşletmelerde ihtiyaç duyulacak insan sayısının azalacak olması sebebiyle azalan iş fırsatları,
- Endüstri 4.0 için stratejilerin yeterli düzeyde belirlenmemiş olması,
- Endüstri 4.0 üretim süreçlerinin karmaşıklığı şeklinde sıralamak mümkündür.

Bonilla ve diğerleri (2018), Endüstri 4.0 uygulamalarının çevre üzerindeki bazı olumsuz etkilerini aşağıdaki gibi açıklamışlardır:

- Endüstri 4.0 teknolojilerinin dünyada yaygınlaşması sürecinde yeni ekipmanların üretilmesi ve kullanılması gerekecektir. Bu durum eski ekipmanların imhası ve yenilerinin üretimi için kaynak kullanımı, elektronik atıklarının artması, atıkların taşınması, depolanması, imha edilmesi için kaynak kullanımı anlamına gelecektir.
- Dijital teknolojilerin üretimi için gerekli olan hammaddeler doğada az bulunan, çıkarılması, işlenmesi ve geri dönüştürülmesi zor maddelerdir. Dijitalleşme bu maddelere olan talebin artması anlamına gelmektedir. Çevre açısından bakıldığında bu maddelerin sürdürülebilirliğinin sağlanmasının zor olacağı ortaya çıkmaktadır.
- Endüstri 4.0 kapsamında yoğun teknoloji kullanımı, ciddi miktarlarda enerji tüketimi anlamına gelmektedir. İnsan gücünün yerini robotların ve makinelerin alması daha fazla enerji kaynağı kullanımını gerektirecektir ve bu enerjinin yenilenebilir kaynaklardan elde edilmediği durumlarda, enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği sağlanamayacaktır.

6.2. Endüstri 4.0 Bileşenlerinin Sürdürülebilir Üretimde Kullanımı

Akıllı üretim; verimlilik, kalite, teslimat, esneklik, insanlar ve çevre gibi mevcut ana üretim faktörlerinin yönetimi ve iyileştirilmesi yoluyla sürdürülebilirliği sağlayabilecek ve Endüstri 4.0'ın uygulamaları olan Nesnelerin İnterneti, Siber-fiziksel Sistemler, büyük veri, bulut vb. teknolojilerin dengeli bir şekilde geliştirilmesi ve uygulanmasıyla başarılı olabilecek

bir kavramdır (Kang vd., 2016). Nesnelerin İnternetinin akıllı üretimde kullanılmasıyla birçok fayda sağlanabilir, örneğin (Vermesan vd., 2013):

- Akıllı ürün yönetimi ile stok işlemlerini otomatikleştirmek için ürünlerin raflardaki ve depolardaki rotasyonunun kontrolü yapılabilir.
- RFID, sensorlar, video izleme, uzaktan bilgi dağıtımını kullanarak üretim hattı izlenebilir ve yönetilebilir.
- Bulut çözümleri ile elde edilen üretim hattına ait bilgiler kurumsal temelli sistemlere aktarılabilir. Bu durum, karar vericiler tarafından ürün kalite güvence sürecinin hızla iyileştirmesini sağlayabilir. Gerçek zamanlı olarak dijital ekranlar sayesinde süreçte yer alan kişilere güncellenmiş iş akış şemalarını, denetim prosedürlerini yollayarak bu iyileştirmeyi sağlanabilir.
- Telework uygulamasıyla çalışanlar evlerinde çalışabilirler. Bu sayede maliyetler düşürülür, verimlilik artar, düşük ofis giderleri (enerji giderleri) ve yeni istihdam fırsatları gibi faydalar elde edilir.

Endüstri 4.0 teknolojileri üretimin tüm aşamalarında enerji, malzeme, su gibi kaynakların daha etkin kullanımını sağlayacaktır. Üretim ortamlarındaki akıllı üretim sistemleri ile makine, ekipman, ürünler ve nakliye gibi süreçler birbirleri ile iletişimde olduklarından üretim parametreleri, müşteri ihtiyaçları, çevresel performans gibi durumlarda kendilerini de ayarlayabileceklerdir. Bu sayede çevreye duyarlı kararlar alınması da kolaylaşmaktadır (de Sousa Jabbour vd., 2018). Daha detaylı bakılacak olursa, Endüstri 4.0 uygulamaları müşteri bilgisini baz aldığından, talebe göre tasarım ve gerekli miktarda üretim yaparak fazla ürün üretimini ve stok oluşumunu, gereksiz malzeme kullanımını ve taşınmasını engeller, kaynakların kontrollü şekilde kullanımını sağlar, proaktif bakım sayesinde hatalı ürün üretimini dolayısıyla fazla enerji kullanımını azaltır. Eklemeli üretim, etkin kapasite kullanımını ve daha az malzeme kullanımını sağlar. Üretim hattında robotların kullanılması üretim süreçlerinde hata yapma olasılığını, otonom taşıma araçlarının kullanılması da ürünlerin hasar görme riskini ve üretim kayıplarını azaltır, böylece genel olarak enerji ve malzeme kullanımı azaltılır (Braccini ve Margherita, 2019). Üretim sonrasında ise enerji-etkin ve karbon-etkin nakliye rotaları oluşturulur, çevresel performansın daha doğru verilerle takibi sağlanır (Kamble vd., 2018; de Sousa Jabbour vd., 2018).

Çevresel sürdürülebilirlikte önemli bir yeri olan enerji tüketimini düzenleme ve azaltma konusunda Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanılabileceği düşünülmektedir. Akıllı üretim sistemlerinde üretim şirketlerinin enerji santralleri ile bağlantılı olması sayesinde enerji

yoğun faaliyetlerin çizelgelenebileceği veya enerji fazlasının çevredeki diğer işletmeler/konutlar tarafından kullanılabilirliği belirtilmektedir (Waibel, Steenkamp, Moloko ve Oosthuizen, 2017; Kamble vd., 2018). Üretimde kullanılacak olan akıllı makineler sayesinde (molalarda enerji tasarrufu, hız kontrollü motorlar vb.) enerji tüketimi azaltılabilecektir (Wang vd., 2016). Gelecekte Nesnelerin İnterneti (akıllı sayaçlar) enerji kalitesinin izlenmesinde, bir ürün/süreç üretmek için tüketilen enerji maliyetini hesaplamada, fabrikanın kendi enerji gücünü kendisi ürettiği durumlarda yenilenebilir enerjiyi verimli bir şekilde kullanmak amacıyla, şebekeden enerji fiyat bilgisi almak ve buna göre enerji tüketimini ayarlamak için kullanılabilir. Üretimde enerji tüketimini makine seviyesinde takip etmek amacıyla gelişmiş teknolojilerin kullanımı, işletmede ve tüm değer zincirinde enerji tüketiminin azalmasını sağlayabilecektir (Birkel, Veile, Müller, Hartmann ve Voigt, 2019). Endüstri 4.0 teknolojilerinin enerji kontrolünde doğrudan kullanılması ile birçok fayda elde edilebilecektir, örneğin (Shrouf ve Miragliotta, 2015):

- Üretim sürecinde benzer süreçlerin enerji tüketim miktarları takip edilerek israf kaynağında meydana gelen sapmalar bulunabilir ve bu sapmalar düzeltilir.
- Üretimin planlanması aşamasında ürünler arası geçişlerde enerji tüketimini azaltacak üretim planlarının ve üretim rotalarının yapılması sağlanabilir.
- Enerji tüketim maliyetlerinin yüksek olduğu zamanları dikkate alarak işletme faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi sağlanabilir.
- Üretim süreçlerinden meydana gelen karbon ayak izinin ölçülmesi, azaltılması sağlanabilir. Ölçüm ve azaltım faaliyetleri sonucunda elde edilen verilerin hissedarlara açık hale getirilmesiyle işletmenin çevresel itibarı iyileştirilebilir, müşterilerin çevre açısından işletme memnuniyetlerinin artması sağlanabilir.

Endüstri 4.0 teknolojileri ile mümkün kılınan ve enerji tüketiminin düzenlenmesine ilişkin belirtilen bu uygulamaların hepsi sürdürülebilir üretimin hem çevresel hem de ekonomik açıdan sağlanmasında önemli rol oynayacaktır. Endüstri 4.0 teknolojileri (örneğin sensorlar) üretim sistemine dâhil edildiğinde, işgücünün azaltılması, makinenin üründeki hatayı algılaması gibi uyarıcı ve israfı engelleyici önlemler alınabilir ve sürdürülebilir üretim yaklaşımları uygulanabilir. Böylece, arızalı ürünlerin yapımında tüketilen hammaddelerden tasarruf sağlanabilecek, arızalı bileşenleri tamir ve yeniden işleme, bunlar için gerekli alanı, ısıtma, soğutma ve aydınlatma için enerji tüketimi ortadan kaldırılacak (Chiarini, 2014), gereksiz hammadde tüketimi engellenecek, kaynak tüketimi fazla olan işlemler tanımlanabilecek, bu süreçler optimize edilerek veya ortadan kaldırılarak (Blunck ve

Werthmann, 2017) sürdürülebilir üretim sağlanabilecektir. Benzer şekilde akıllı malzemelerin kullanılmasıyla birlikte kaynaklar sadece üretim sürecinde değil, RFID teknolojisi kullanılarak dâhil oldukları ürünün yaşam döngüsü boyunca izlenebilecek ve bu sayede israfı azaltmak ve yeniden kullanımını artırmak mümkün olacaktır (Blunck ve Werthmann, 2017). Ayrıca bu şekilde ürünlerin izlenebiliyor olması, işletmelerin ürünlerle ilgili bilgi toplamalarını ve bu toplanan bilgilerle müşterilerinin tüketim modellerini anlamasını ve ürün/hizmet geliştirme gibi faaliyetlerine yön vermelerini de sağlayacaktır (de Sousa Jabbour vd., 2018). Bir diğer Endüstri 4.0 teknolojisi olan eklemeli üretim, 3D baskı ile ürünlerin kişiselleştirilmesi gerçekleştirilirken, geleneksel üretime kıyasla daha az atık üreterek sürdürülebilirliğe de katkı sağlanabilecektir (Frank, Dalenogare ve Ayala, 2019).

Endüstri 4.0 teknolojileri, müşterinin talebinin tam anlamıyla anlaşılabilmesi, örneğin talep tahminlerinin doğruluğunun artırılması gibi konularda kullanılabilir, müşteri talebi ile ürün arzı arasında eşleşme sağlanabilir (Wee, Kelly, Cattel ve Breunig, 2015). Böylece ürünlerin stoğa üretilmesine gerek kalmaz, stok için üretimde hammadde kullanımı engellenir, stokta bekleyen ürünlerin modasının veya son kullanma tarihlerinin geçmesi durumları ortadan kaldırılır ve stok ürünlerinin bertaraf edilebilmesi için kaynak tüketiminden tasarruf sağlanır. Bu temel faydalara ek olarak bu ürünlerin korunmasında kullanılan ambalaj malzemelerinin veya ürünlerin depolandığı alanların ısıtma, soğutma, aydınlatması için kullanılacak olan enerji gibi birçok konuda da tasarruf sağlanır (Chiarini, 2014). Bu gibi değişiklikler, üretim ve depolama esnasındaki karbon salınımının azalmasını da sağlayacaktır.

İşletmelerin Endüstri 4.0 teknolojileri sayesinde, makineleri gerçek zamanlı olarak izleyebiliyor ve veri edinebiliyor olmaları (Garetti ve Taisch, 2012) işletmelere olası arızaların erken tespit edilmesini ve önleyici bakımların yapılmasını sağlayarak makine duruş sürelerinin, zararlı atık oluşumunun, üretim atıklarının, enerji kullanımının ve makinelerin yenileme sıklığının azaltılması imkânı sağlar (Blunck ve Werthmann, 2017; Franciosi vd., 2018).

Endüstri 4.0 teknolojilerinden biri olan büyük veri ile kontrol edilen akıllı fabrikalarda, üretim sürecinin optimizasyonu sağlandığından, ortalama üretim rotası kısalacak, makinelerin ve diğer üretim kaynaklarının verimli kullanımı söz konusu olacak ve büyük veri analizi ile istikrarlı bir ürün kalite düzeyi ve ürün çıktı düzeyi elde edilebileceğinden, üretim süreci hakkında doğru bir bilgi oluşturma şansı olacaktır (Wang vd., 2016). Bu sayede üretim için ihtiyaç duyulan hammaddeler üretimden önce belirlenebilir ve üretim fazlalığı engellenebilir. Bu üretim ortamında makineler daha akılcı şekilde

kullanıldığından enerji tüketimi azaltılabilir, üretime ait gerçek zamanlı veriler alındığından performans göstergeleri elde edilebilir ve üretim ile ilgili daha hızlı ve etkin kararlar alınması sağlanabilir (Wang vd., 2016).

Benzer durum, ömür sonuna ulaşmış ürünler için de geçerlidir. Ürün yaşam döngüsü boyunca ürünle ilgili her bilgiye ulaşılabildiğinden ve kayıt edildiğinden, karmaşık ürünlerin dahi demontajı daha düşük maliyetli olmakta, parçalar hakkında yeniden kullanım, tamir, geri dönüşüm, yok etme vb. kararlar sağlıklı şekilde verilebilmektedir. Bu da hem daha düşük maliyet, hem de malzeme ve enerji gibi kaynakların etkin kullanımı demektir (Garetti ve Taisch, 2012; Gabriel ve Pessl, 2016). Endüstri 4.0'ın lojistik sektöründe uygulanması ile akıllı taşıma sistemlerinde yakıt tasarrufu, kamyon sürücülerinin enerji açısından verimli bir sürüş tarzını benimsemesi, karbon emisyonlarını ve hava kirliliğini azaltmak gibi farklılıklar sağlayabileceği dolayısıyla nakliye ve ulaşımda sürdürülebilirliğin çevresel boyutuna katkıda bulunulabileceği düşünülmektedir (Barreto vd, 2017).

Yönetimsel açıdan bakıldığında Endüstri 4.0 dâhilindeki teknolojik gelişmeler kaynakların etkin kullanımını ve uzaktan yönetimini mümkün kılmaktadır. Bu da insan kaynaklarında iyileşme, enerjide ve malzeme kullanımında etkinlik, karbon ayak izi azaltma gibi faydalar önermekte, böylece yeşil üretim ve kapalı çevrimli tedarik zincirleri oluşturulabilmektedir.

7. SONUÇ

Son yıllarda etkisi oldukça fazla hissedilen iklim değişikliği, küresel ısınma vb. çevre sorunları sebebiyle sürdürülebilirlik sıkça kullanılan bir kavram haline gelmiştir. Daha yaşanabilir ve kaynakların tükenmediği bir dünya için, üretim faaliyetlerinde kullanılan sistemlerin, kaynakların sürdürülebilirliğine katkıda bulunması gerekmektedir. Üretim sistemlerinde ciddi dönüşümlere sebep olan Endüstri 4.0 bileşenleri, çevresel sürdürülebilirliği sağlama konusunda önemli bir fırsat olarak görülebilir. Akıllı fabrikaların üretim süreçlerine hâkim olduğu bir sistemde doğal kaynakların sürdürülebilirliği daha kolay olacaktır. Birbiriyle konuşan makineler, kusurlu üretim miktarının azalmasını sağlayacak ve kaynak israfını engelleyebilecektir. Endüstri 4.0 sayesinde birbirleri ile iletişim halinde olan birimler, ilgili bölümlerin taleplerini gerçek zamanlı olarak optimize edecek ve maliyet, kirlilik, hammadde kullanımı ve karbon emisyonları azaltılabilecektir.

Endüstri 4.0 kavramı, insanoğlunun hayal edebildiği her şeyi, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğin mümkün olabileceği bir dünyanın gelecek yıllarda bizleri beklediğini

göstermektedir. Endüstri 4.0, bilgileri ve teknolojileri sayesinde daha etkin ve daha doğru kararlar alınması için bir zemin sağlayacaktır. Ancak yapılan akademik çalışmalar ve teknolojik gelişmelere rağmen, Endüstri 4.0 uygulamaları ile teknolojik yapılabirlik arasında halen farklılıklar bulunmaktadır. Bu durum kavramın ve bileşenlerinin birçok aşamada soyut kavramlar olarak kalmasına sebep olmaktadır. Endüstri 4.0'ın işletmelere uyarlanması aşamasında aşağıda belirtilen konulara dikkat edilmesi önerilmektedir:

- Yöneticilerin Endüstri 4.0'ın potansiyel riskleri ve faydaları farkında olması gereklidir. Yönetim faaliyet ve süreçlerindeki olası değişimler de, yine organizasyon ve üretim yapısında değişikliklere ihtiyaç duyabilir. Özellikle insan kaynakları, eğitim ve yeni çalışan yetenekleri gerekliliklerine hazır olunmalıdır (Müller vd., 2018, Kiel vd., 2017). Benzer şekilde işletmenin tüm süreçlerinde bütünsel fayda için tedarik zincirindeki diğer işletmelerle daha fazla bağlantı kurmasına ihtiyaç duyulacağı da açıktır (Kiel vd., 2017).
- Endüstri 4.0 yapısı, donanım iletişimi, bilgi paylaşımı, otomatikleşmiş sistem, tahmin edici bakım ve kendini düzenleyebilen zeki üretim sistemleri vb. oluşmaktadır. Farklı düzeylerde farklı konulardaki gelişmişlik düzeyinin daha iyiye çıkarılması ve bütünleştirilmesi için sektörler ve işletmeler için altyapı oluşturulması, önceliklerin belirlenerek yol haritasının çizilmesi ve bunun için yönetsel ve insan gücüne dair yönlendirmelerin yapılması gereklidir.
- Endüstri 4.0 ve çevresel sürdürülebilir üretimin entegrasyonunu sağlayabilmek için işletme kültürü, takım çalışması, eğitim ve işletme kapasitesi, stratejik anlaşmalar, üst yönetimin katılımı, liderliğin yönetimi, iletişim, proje yönetimi, ulusal kültür ve bölgesel farklılıklar gibi entegrasyonun sağlanması konusunda kritik rol oynayan konular üzerinde dikkatle çalışması gerekmektedir (de Sousa Jabbour vd., 2018).
- Teknolojilerdeki gelişmelere karşın, halen araştırılması gereken birçok konu da bulunmaktadır. Teknolojilerin uygulama esnasında birbiriyle ve iş süreçleriyle uyumlaştırılması, araştırılması gerekli konulardan biridir. Teknoloji gelişiminin pratikte de uygulanabilmesi için amaçlar doğrultusunda ve her seviyeye kendine uygun olacak şekilde uygulanması, sadece kısıtlı alanlarda örneğin birimler veya süreçler bazında değil, tüm işletme hatta tedarik zinciri boyunca faydalanabilmesi için gereklidir. Fiziksel sistemlerden sanal sistemlere geçişin oluşturacağı etki, katabileceği değer, sürdürülebilirlik üzerindeki ölçülebilir etkisi ve bunun için kullanılabilecek işletme modelleri üzerinde detaylı çalışılmalıdır.

Dünya henüz dördüncü sanayi devrimini çözmeye çalışmaktayken Japonlar tarafından 2017 yılında ortaya atılan, Japonya önderliğinde ilerleyecek gibi görünen ve Endüstri 5.0 olarak adlandırılan sıradaki devrim, toplum, yönetim ve yapılar üzerinde gerçekleşecek ve teknolojileri insan yaşamını daha kolaylaştırmak için kullanmaya odaklanacaktır. Bu sebeple Toplum 5.0 olarak da adlandırılan bu devrimde, Endüstri 4.0'ın akıllı fabrikalarının robot ve insan etkileşimine dönüşeceği, dolayısıyla işletmelerin ve üretim süreçlerinin, sektörel hatta ülke olarak bu dijital dönüşüme hazırlanması gerektiği açıktır.

Bu çalışma, literatür taramasına ve ampirik veriye dayanarak oluşturulmuştur. Yeni bir teknoloji veya sistem uygulanmasından önce akla gelen, "ne gibi faydaları ve zorlukları olacak" sorusuna cevap aramak amacıyla tarihçe, yöntemler gibi gerekli tanımlamalardan başlamak üzere, her bir teknoloji ve yönetimin, sürdürülebilir üretim sistemleri üzerindeki etkileri ve faydalarına değinilmiştir. Dolayısıyla bu çalışma teorik katkı olarak, işletmelere ulaşılabilir faydaları sunmayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında literatürde henüz yeterli sayıda çalışma olmaması sebebiyle Endüstri 4.0 ve sürdürülebilir üretim kavramları birlikte ele alınmış, sürdürülebilir üretimde Endüstri 4.0 bileşenlerinin nasıl kullanılabileceği, sürdürülebilir üretim açısından devrimin olumlu olumsuz yönleri açıklanmaya çalışılmıştır. Endüstri 4.0 uygulamaları oldukça yakın bir geçmişe sahiptir. Dolayısıyla sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini, geniş çaplı uygulamalarla görme, test etme, karşılaştırma ve genelleme durumu henüz mümkün olmamaktadır (Müller vd., 2018). Bu sebeple gelecek çalışmalar için sürdürülebilir üretimin performans değerlendirme ölçütlerinin Endüstri 4.0 uygulamaları için geliştirilmesi, işletmelerin kullanmış oldukları Endüstri 4.0 bileşenlerinin sürdürülebilir üretime katkılarının gerçek uygulamalarla ölçülerek ortaya çıkarılması, işletmelerin tüm süreçlerinde benzer uygulamaların yapılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

Akben, İ., & Avşar, İ.İ. (2018). Endüstri 4.0 ve Karanlık Üretim: Genel Bir Bakış. *Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 26-37.

Aksoy, S. (2017). Değişen Teknolojiler ve Endüstri 4.0: Endüstri 4.0'ı Anlamaya Dair Bir Giriş. *SAV Katkı*, 4, 34-44.

Alayon, C., Safsten, K., & Johansson, G. (2017). Conceptual sustainable production principles in practice: Do they reflect what companies do? *Journal of Cleaner Production*, 141, 693-701 DOI 10.1016/j.jclepro.2016.09.079.

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.jestech.2019.01.006.

Almada-Lobo, F. (2015). The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of Innovation Management*, 3 (4): 16-21

Anderl, R. (2014). Industrie 4.0 - Advanced Engineering of Smart Products and Smart Production. Technological Innovations in the Product Development, *19th International Seminar on High Technology*, Piracicaba, Brasil October 9th, 2014.

Aracıoğlu, B. (2010). Üretim/İşlemler Yönetimi Alanında Yaşanan Paradigmatik Değişimler Kapsamında Sürdürülebilir Üretim. *Ege Akademik Bakış, Ekonomi, İşletme, Uluslararası İlişkiler ve Siyaset Bilimi Dergisi*, 141-156.

Bağcı, E. (2018). Endüstri 4.0: Yeni Üretim Tarzını Anlamak. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi*, 9(24), 122-146.

Barreto, L., Amaral, A., & Pereira, T. (2017). Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing*, 13, 1245-1252.

Birkel, H.S., Veile, J.W., Müller, J.M., Hartmann, E., & Voigt, K.I. (2019). Development of a risk framework for Industry 4.0 in the context of sustainability for established manufacturers. *Sustainability*, 11(2), 384. doi:10.3390/su11020384

Blinder, A. S. (2006). Offshoring: the next industrial revolution?. *Foreign affairs*, 113-128.

Blunck, E., & Werthmann, H. (2017). Industry 4.0—An opportunity to realize sustainable manufacturing and its potential for a circular economy. *Dubrovnik International Economic Meeting*, 3(1), 644-666.

Bonilla, S.H., Silva, H.R.O., da Silva, M.T., Gonçalves, R.F., & Sacomano, J.B. (2018). Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. *Sustainability*, 10(10), 3740. doi.org/10.3390/su10103740.

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.

Buxmann, P., Hess, T., & Ruggaber, R. (2009). Internet of services. *Business & Information Systems Engineering*, 1(5), 341. doi.org/10.1007/s12599-009-0066-z.

Cardoso, J., Voigt, K., & Winkler, M. (2008). Service engineering for the internet of services. In *International Conference on Enterprise Information Systems* (pp. 15-27). Springer, Berlin, Heidelberg. doi.org/10.1007/978-3-642-00670-8_2.

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.

Chaim, O., Muschard, B., Cazarini, E., & Rozenfeld, H. (2018). Insertion of sustainability performance indicators in an industry 4.0 virtual learning environment. *Procedia Manufacturing*, 21, 446-453 DOI 10.1016/j.promfg.2018.02.143.

Chiarini, A. (2014). Sustainable manufacturing-greening processes using specific Lean Production tools: an empirical observation from European motorcycle component manufacturers. *Journal of Cleaner Production*, 85, 226-233. doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.080

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.

Cordes, F., & Stacey, N. (2017). Is UK Industry Ready for the Fourth Industrial Revolution. *The Boston Consulting Group: Boston, MA, USA*.

de Man, J., & Strandhagen, J.O. (2017). An Industry 4.0 research agenda for sustainable business models. *Procedia CIRP*, 63, 721-726 DOI 10.1016/j.procir.2017.03.315

de Ron, A.J. (1998). Sustainable production: the ultimate result of a continuous improvement. *International Journal of Production Economics*, 56, 99-110.

de Sousa Jabbour, A.B.L., Jabbour, C.J.C., Foropon, C., & 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 and Social Change*, 132, 18-25. doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.017.

Despeisse, M., Mbaye, F., Ball, P.D., & Levers, A. (2012) The emergence of sustainable manufacturing practices, *Production Planning & Control*, 23:5, 354-376, DOI 10.1080/09537287.2011.555425

Despeisse, M., Mbaye, F., Ball, P.D., & Levers, A. (2012). The emergence of sustainable manufacturing practices. *Production Planning & Control*, 23(5), 354-376.

Dossou, P.E. (2018). Impact of sustainability on the supply chain 4.0 performance. *Procedia Manufacturing*, 17, 452-459 DOI 10.1016/j.promfg.2018.10.069

Dutton, W.H., (2014). Putting things to work: social and policy challenges for the Internet of things. *info*, 16(3), 1-21 DOI 10.1108/info-09-2013-0047

Ehrenfeld, J.R. (2005). The roots of sustainability. *MIT Sloan Management Review*, 46(2), 23.

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. In *First Workshop on Green (Responsible, Ethical, Social/Sustainable) IT and IS—the Corporate Perspective, Vienna, WU*.

Erol, S., Jägera, A., Hold, P., Otta, K., & Sihm, W. (2016). Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. *Procedia CIRP*, 54, 13-18. doi:10.1016/j.procir.2016.03.162

Franciosi, C., Iung, B., Miranda, S., & Riemma, S. (2018). Maintenance for sustainability in the industry 4.0 context: A scoping literature review. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 903-908. doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.459

Frank, A.G., Dalenogare, L.S., & Ayala, N.F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26. doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004.

Gabriel, M., & 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.

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.

Gavrilescu, M. (2004). Cleaner production as a tool for sustainable development. *Environmental Engineering and Management Journal*, 3(1), 45-70.

Genç, S. (2018). Sanayi 4.0 Yolunda Türkiye. *Sosyoekonomi*, 26 (36), 235-243.

Goodland, R. (1995). The concept of environmental sustainability. *Annual review of ecology and systematics*, 26(1), 1-24.

Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)* (pp. 3928-3937). IEEE Computer Society Washington, DC, USA.

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.

Hofmann, E., & Rüşch, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34 DOI 10.1016/j.compind.2017.04.002.

IERC (2014). *European Research Cluster on the Internet of Things*. Internet of Things. Erişim adresi: http://www.internet-of-things-research.eu/about_iot.htm. Erişim Tarihi 10.05.2019..

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.

Jayal, A.D., Badurdeen, F., Dillon, O.W., & Jawahir, I.S. (2010). Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2(3), 144-152. doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.03.006.

Jazdi, N. (2014) Cyber Physical Systems in the Context of Industry 4.0. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics* DOI 10.1109/AQTR.2014.6857843.

Jensen, M.C. (1993). The modern industrial revolution, exit, and the failure of internal control systems. *The Journal of Finance*, 48(3), 831-880. doi.org/10.1111/j.1540-6261.1993.tb04022.x.

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., Anderl, R., Gausemeier, J., Schuh, G., & Wahlster, W. (Eds.). (2016). *Industrie 4.0 in a Global Context: strategies for cooperating with international partners*. Munich:Herbert Utz Verlag.

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 Wirtschaft.V.

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013b). Securing the future of German manufacturing industry. *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE*, 4(199), 14.

Kamble, S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S.A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408–425. doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009.

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.

Kayikci, Y. (2018). Sustainability impact of digitization in logistics. *Procedia Manufacturing*, 21, 782-789 DOI 10.1016/j.promfg.2018.02.184.

Kiel, D., Muller, J., Arnold, C., & Voigh, K. (2017). Sustainable Industrial Value Creation: Benefits and Challenges of Industry 4.0. *XXVIII ISPIM Innovation Conference – Composing the Innovation Symphony*, Austria, Vienna. 18-21 June 2017.

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.

Lee, E.A. (2008). Cyber physical systems: Design challenges. In *11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 363-369.

Lee, J., Kao, H.A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*, 16, 3-8. doi.org/ 10.1016/j.procir.2014.02.001

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: 01.04.18.

MacDougall, W. (2014). *Industrie 4.0: Smart manufacturing for the future*. Germany Trade & Invest.

Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019) A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 925–953 DOI 10.1016/j.cie.2018.11.030.

Mario, H., Tobias, P., & Boris, O. (2015). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. *Working Paper No.01/2015*, Technische Universität Dortmund, Fakultät Maschinenbau, Audi Stiftungslehrstuhl Supply Net Order Management.

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

Moktadir, A., Ali, S.M., Kusi-Sarpong, S., & Shaikh A.A. (2018). Assessing Challenges for implementing Industry 4.0: Implications for process safety and environmental protection. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 730-741 DOI 10.1016/j.psep.2018.04.020.

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.

Müller, J.M., Kiel, D., & Voigt, K.I. (2018). What drives the implementation of industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability*, 10(1), 247. doi.org/10.3390/su10010247.

Nakıboğlu, G. (2014). Üretimde Çevreye Duyarlı Yaklaşım. (Ed: Günaydın, İ.; Özsoy, T.) *Disiplinler arası bakış açısı ile çevre*, 2, 202. İstanbul: Hiperlink Yayınevi.

Öksüz, M.K., Öner, M., & Öner, S.C. (2017). Yalın Üretim Tekniklerinin Endüstri 4.0 Perspektifinden Değerlendirilmesi. 4. *Uluslararası Bölgesel Kalkınma Konferansı*. Munzur Üniversitesi, Tunceli.

Ovacı, C. (2017). Endüstri 4.0 Çağında Açık İnovasyon. *Maliye Finans Yazıları*, Özel Sayı, 113-132.

Özsoylu, A.F. (2017). Endüstri 4.0. *Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 21(1), 41-64.

Pamuk, N.S., & Soysal, M. (2018). Yeni Sanayi Devrimi Endüstri 4.0 Üzerine Bir İnceleme. *Verimlilik Dergisi*, (1), 41-66.

Pereira, A.C., & Romero, F. (2017). A review of the meaning and implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, 13, 1206–1214 DOI 10.1016/j.promfg.2017.09.032.

Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*, 52, 173-178 DOI 10.1016/j.procir.2016.08.005.

Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L., & Stankovic, J. (2010). Cyber-physical systems: the next computing revolution. In *Design Automation Conference* , 731-736. California, USA.

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.

Santos, C., Mehraei, A., Barros, A.C., Araujo, M., & Ares, E. (2017) Towards Industry 4.0: an overview of European strategic roadmaps. *Procedia Manufacturing*, 13, 972-979. DOI 10.1016/j.promfg.2017.09.093.

Santucci, G. (2010). The internet of things: Between the revolution of the internet and the metamorphosis of objects. *Vision and Challenges for Realising the Internet of Things*, 11-24.

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.

Shrouf, F., & Miragliotta, G. (2015). Energy management based on Internet of Things: practices and framework for adoption in production management. *Journal of Cleaner Production*, 100, 235-246. doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.055.

Song, Z., & Moon, Y., (2017). Assessing sustainability benefits of cybermanufacturing systems. *Int J Adv Manuf Technol*, 90, 365–1382 DOI 10.1007/s00170-016-9428-0.

Soubbotina, T.P. (2004). *Beyond economic growth an introduction to sustainable development*. 2nd edition, USA: World Bank.

Soylu, A. (2018). Endüstri 4.0 ve Girişimcilikte Yeni Yaklaşımlar. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 32, 43-57.

Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536-541. doi. org/10.1016/j.procir.2016.01.129.

Stock, T., Obenaus, M., Kunz, S., & Kohl, H. (2018). Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. *Process Safety and Environmental Protection*, 118, 254–267 DOI 10.1016/j.psep.2018.06.026.

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.

Thurow, L.C. (2000). *New rules in Globalization and the Challenges of a New Century: A Reader*, 244 O'Meara, P., Mehlinger, H., Mehlinger, C. & Krain, M. (eds). *Globalization and the challenges of a new century: a reader*. USA: Indiana University Press.

Toker, K. (2018). Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirliğe Etkileri. *Istanbul Management Journal*, 29(84), 51–64 DOI 10.26650/imj.2018.29.84.0001.

Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı- TTVV (2011) *Sanayide Eko-verimlilik (Temiz Üretim) Kılavuzu: Yöntemler ve Uygulamalar*. https://www.ekoverimlilik.org/wp-content/uploads/2011/11/Sanayide_Eko-verimlilik_Temiz-Uretim_Kilavuzu-Yontemler-ve-Uygulamalar.pdf , Erişim Tarihi:25.10.19.

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.

Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 – A Glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233-238 DOI 10.1016/j.promfg.2018.02.034.

Vermesan, O., Friess, P., Guillemin, P., Gusmeroli, S., Sundmaeker, H., Bassi, A., Jubert Soler, I., Mazura, M., Harrison, M., Eisenhauer, M., Doody, P. (2011). Internet of things strategic research roadmap. *Internet of things-global technological and societal trends, 1*, 9-52 Aalborg, Denmark: River Publishers.

Vermesan, O., Friess, P., Guillemin, P., Sundmaeker, H., Eisenhauer, M., Moessner, K., Arndt, M., Spirito, M., Medagliani, P., Giaffreda, R., Gusmeroli, S., Ladid, L., Serrano, M., Hauswirth, M. & Baldini, G. (2013). Internet of things strategic research and innovation agenda. Vermesan, O. and Friess, P. (Eds.) In *Internet of things: converging technologies for smart environments and integrated ecosystems*, 7-152. Aalborg, Denmark: River Publishers.

von Tunzelmann, N. (2003). Historical coevolution of governance and technology in the industrial revolutions. *Structural Change and Economic Dynamics*, 14, 365-384 DOI 10.1016/S0954-349X(03)00029-8.

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.org/10.1016/j.promfg.2017.02.094.

Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 1-10. doi.org/10.1155/2016/3159805.

Wee, D., Kelly, R., Cattell, J., & Breunig, M. (2015). *Industry 4.0-how to navigate digitization of the manufacturing sector*. McKinsey & Company, 58. Dusseldorf, Germany.

White, M.A. (2013). Sustainability: I know it when I see it. *Ecological Economics*, 86, 213-217.

Witkowski, K. (2017). Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 – Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management. *Procedia Engineering*, 182, 763-769 DOI 10.1016/j.proeng.2017.03.197

World Economic Forum (2016). *The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond*. Erişim Adresi: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond>, Erişim Tarihi: 25.06.19.

Yavuz, V.A. (2010). Sürdürülebilirlik Kavramı ve İşletmeler Açısından Sürdürülebilir Üretim Stratejileri. *Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 7(14), 63-86.

Yıldız, A. (2018). Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 546-556.

Zhang, H.C., Kuo, T.C., Lu, H., & Huang, S.H. (1997). Environmentally conscious design and manufacturing: a state-of-the-art survey. *Journal of manufacturing systems*, 16(5), 352-371. DOI 10.1016/S0278-6125(97)88465-8.