

Üretim Sistemlerinde Dijitalleşme ve Sürdürülebilirlik Üzerine Bir Araştırma¹

A Research on Digitalization and Sustainability in Manufacturing Systems

Yeşim Deniz ÖZKAN ÖZEN¹ Haluk SOYUER² Yiğit KAZANÇOĞLU³

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Yaşar Üniversitesi

² Prof. Dr., Ege Üniversitesi

³ Prof. Dr., Yaşar Üniversitesi

Özet

Dijitalleşme ve sürdürülebilirlik, günümüz üretim sistemlerini şekillendiren iki temel unsurdur. Dördüncü Endüstri Devrimi kapsamında dijital teknolojilerle entegre hâle gelen üretim sistemlerinde, yalnızca ekonomik fayda sağlamakla kalmayıp, çevresel ve sosyal boyutların da dikkate alındığı sürdürülebilir yaklaşımların benimsenmesi gerekmektedir. İlgili literatür incelendiğinde, dijitalleşme ve sürdürülebilirlik kavramlarını birlikte ele alan çalışmaların sayısının giderek arttığı görülmektedir. Bu çalışmanın amacı, öncelikle üretim sistemlerinde dijitalleşme ve sürdürülebilirlik konularına odaklanan çalışmaları kapsamlı bir literatür incelemesiyle analiz etmek ve ardından bibliyometrik analiz aracılığıyla alandaki temel yaklaşımları ortaya koymaktır. Çalışma sonucunda belirlenen temel yaklaşımlar; dijital ekonomi ve sürdürülebilirlik, dijital dönüşüm ve iş modelleri, döngüsel ekonomi, akıllı teknolojiler ile çevresel ve sosyal faktörler şeklinde gruplandırılmıştır. Bu çalışmanın hem akademik literatüre katkı sunması hem de uygulamaya yönelik politika geliştirme ve iş stratejilerine teorik bir temel oluşturması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dijitalleşme, Sürdürülebilirlik, Üretim Sistemleri, Sürdürülebilir Üretim, Endüstri 4.0

Abstract

Digitalization and sustainability are two fundamental elements shaping current manufacturing systems. Within the scope of the Fourth Industrial Revolution, production systems integrated with digital technologies are expected not only to generate economic value but also to adopt sustainable approaches that consider environmental and social dimensions. A review of the relevant literature reveals a growing number of studies that address digitalization and sustainability in an integrated manner. The aim of this study is to conduct a comprehensive literature review focusing on digitalization and sustainability in manufacturing systems and to identify the main approaches in the field through bibliometric analysis. The findings of the study categorize the main approaches as follows: digital economy and sustainability, digital transformation and business models, circular economy, smart technologies, and environmental and social factors. This study is expected to contribute to the academic literature and provide a theoretical foundation for the development of policies and business strategies in practice.

Key Words: Digitalization, Sustainability, Manufacturing Systems, Sustainable Manufacturing, Industry 4.0

¹ Bu çalışma Yeşim Deniz Özkan Özen'in Prof. Dr. Haluk Soyuer ve Prof. Dr. Yiğit Kazançoğlu danışmanlığında tamamlanan "Dijitalleşen Üretim Sistemlerinde Sürdürülebilirlik Değerlendirme Modeli Tasarımı: Örnek Uygulama" (Tez No: 708648) başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.

Atıf için (how to cite): Özkan Özen, Y. D., Soyuer, H., Kazançoğlu, Y. Üretim Sistemlerinde Dijitalleşme ve Sürdürülebilirlik Üzerine Bir Araştırma. *Fenerbahçe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*. (2025); 5(1), 66-85.

1. Giriş

Günümüzde hızla değişen ve gelişen teknolojiler, üretim sektöründe var olan yaklaşımların köklü biçimde yeniden şekillendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Tüketici taleplerindeki çeşitlenme, küreselleşmenin etkisiyle sınırların silikleşmesi, pazarların birleşmesi ve bilgi-iletişim teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde erişilebilirliğin artması, işletmelerin rekabet avantajı elde edebilmek adına dönüşüm geçirmesini kaçınılmaz hale getirmiştir. Dijital üretim sistemlerinin ön planda olduğu ve Dördüncü Endüstri Devrimi olarak adlandırılan bu yeni dönem, ülkelerin gelişmişlik seviyesi, işletmelerin değişime uyum sağlama yetkinliği ve sermaye yapıları doğrultusunda üretim sistemlerinde yeni bir anlayışın benimsenmesini beraberinde getirmektedir. Bu yeni endüstri devriminin temelini dijital teknolojiler çatısı altında birbiri ile sürekli bir iletişim halinde olan makineler, ürünler ve yöntemler sistemi oluşturmaktadır (Asadollahi-Yazdi ve diğ., 2020).

Dördüncü Endüstri Devrimi yerine sıklıkla kullanılan, Almanya kökenli Endüstri 4.0 kavramının, üretim sistemlerinde yaşanan yapısal dönüşümü açıklamakta yeterli olmadığı düşünülmektedir. Özellikle işletmelerin benimsediği yeni üretim anlayışını tanımlamak amacıyla kullanılan ve çeşitli teknoloji ile yaklaşımları kapsayan Endüstri 4.0'ın, zamanla gelişen teknolojiler doğrultusunda yerini daha kapsamlı bir kavrama bırakması beklenmektedir. Bu nedenle, günümüzdeki endüstriyel dönüşümün, üretim süreçlerinde gerçekleşen sürekli dijitalleşme olarak tanımlanması daha uygun görünmektedir. Bu çalışmada da dijitalleşme kavramı, üretim sektöründeki yeni paradigma değişimini ifade etmek üzere kullanılmaktadır.

Endüstri 4.0 kavramı, her ne kadar dijitalleşme sürecinin simgesel bir ifadesi olarak yaygınlaşmış olsa da, kökeni itibarıyla Almanya'nın yüksek teknoloji stratejisine dayanan bir sanayi politikasıdır. Bu yönüyle, küresel ölçekteki dijital dönüşüm yaklaşımlarının tümünü temsil etmekten uzaktır. Örneğin, Japonya'nın "Toplum 5.0", Çin'in "Made in China 2025", ABD'nin "Advanced Manufacturing Partnership" ve Türkiye'nin "Milli Teknoloji Hamlesi" gibi politikaları, dijital dönüşümün farklı ulusal bağlamlardaki yansımaları olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, literatürde hâlâ en yaygın şekilde kullanılan ve bibliyometrik veri tabanlarında en fazla karşılık bulan çerçeve olması nedeniyle Endüstri 4.0 yaklaşımı temel alınmıştır.

Öte yandan, artan üretim miktarları ve kısalan ürün yaşam süreleri sonucunda, bugünkü kaynakları kullanırken gelecek nesillerin ihtiyaçlarını da göz önünde bulundurulduğu sürdürülebilir üretim yaklaşımlarının benimsenmesi önemli konulardır. Kökeni Latince "Sustinere" kelimesinden gelen sürdürülebilirlik kavramı ilk olarak 1960lı yıllarda kaynak yönetimindeki bilinçsiz yaklaşımlar sonucunda ortaya çıkan çevresel zararlara bir tepki olarak ortaya çıkmıştır. Çevresel konuların küresel anlamda önem kazanması ile birlikte sürdürülebilirlik kavramı ortak bir politik hedef haline gelmiştir. 1960 yılında Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü (OECD) ortak ülkelerdeki insanların yaşam standartlarını arttırmak ve en yüksek seviyede sürdürülebilir ekonomik büyümeyi ve istihdamı sağlamak amacıyla kurulmuştur. Sürdürülebilirliğin günümüzde de en yaygın olarak kullanılan tanımlaması 1987 yılında Birleşmiş Milletler tarafından yayınlanan "Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development" raporunda yapılmıştır. Bu tanıma göre sürdürülebilirlik "gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama yeteneğini tehlikeye atmadan, günümüzde kalkınmanın mümkün kılınmasıdır" (Mckenzie, 2004). Neo-klasik ekonomi teorisine göre sürdürülebilirlik kavramı refah maksimizasyonu olarak tanımlanmakta ve tüketim kaynaklı fayda maksimizasyonu ile refah maksimizasyonunu birleştirerek insan refahının temel unsurlarını içine almaktadır (Tıraş, 2012). Ancak sürdürülebilirlik kavramı günümüzde çok daha geniş alanları kapsayarak, ekonomik, sosyal ve çevresel boyutta çok daha geniş bir anlam kazanmıştır.

Bu açıdan değerlendirildiğinde üretim süreçleri ile hedeflenen ekonomik kazançların çevresel ve sosyal zararlar vermeden önceliklendirilmesi yeni stratejik yaklaşımların vazgeçilmez unsurları olmalıdır (Abbass ve diğ., 2019). Bu bağlamda bakıldığında sürdürülebilir üretim, çevresel kaynakların uzun vadeli devamlılığını sağlayan, çalışanlarının ve toplumun sağlığını, güvenliğini ve refahını ön planda tutan ve bu koşullar altında işletmenin ekonomik çıkarlarını gözetken bir üretim stratejisi olarak

tanımlanabilir (Winroth ve diğ., 2016). İşletmelerde sürdürülebilir üretimin sağlanabilmesi için en önemli adımlardan biri sürdürülebilirliğin tüm boyutlarını göz önünde bulundurarak işletmelerin sürdürülebilirlik değerlendirmesine olanak sağlayan ve sürdürülebilirlik yolunda gerçekleştirilmesi gereken eylemleri içeren bir değerlendirme yapısının ortaya konmasıdır (Moldavska ve Welo, 2019).

Öte yandan dijitalleşen üretim sistemlerinde çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için dijitalleşme ve sürdürülebilirlik kavramlarının ayrılmaz bir bütün olarak işletme stratejilerinin bir parçası haline gelmesi gerekmektedir (Braccini ve Margherita, 2019). Dördüncü Endüstri Devrimi ve sürdürülebilirlik kavramlarını mevcut üretim sistemlerinde iki büyük eğilim olarak tanımlayan de Sousa Jabbour ve diğerleri (2018), dijitalleşme ile sürdürülebilirliğin gerekliliklerini bütünleştirmenin şart olduğunu; ancak bu bütünleşme sonucunda tüm üretim sistemlerini etkileyen bir endüstriyel devrimden söz edilebileceğini savunmaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde yeni nesil dijitalleşen üretim sistemlerinde sürdürülebilirliğin tüm boyutlarını ele alan stratejilerin belirlenmesi işletmelerin varlıklarını sürdürebilmeleri için vazgeçilmez bir unsur olarak nitelendirilebilir. Bu bağlamda, bu çalışmanın amacı dijitalleşme ve sürdürülebilirlik ilişkisine yönelik detaylı bir literatür taraması gerçekleştirmek ve alandaki temel trendleri bibliyometrik analiz ile ortaya koymaktır. Literatürde son dönemde Endüstri 4.0 kavramının yerine daha genel ve esnek yaklaşımlar olan “dijital dönüşüm”, “akıllı üretim sistemleri” veya “Endüstri 5.0” gibi terimlerin öne çıktığı gözlemlenmektedir. Bu değişim, Endüstri 4.0’ın belirli teknoloji kümeleriyle sınırlı kalmasının ötesine geçilerek daha bütüncül ve insan-merkezli üretim anlayışlarını içeren yeni paradigmalara benimsendiğini göstermektedir. Ancak bu çalışmada, hâlen akademik literatürde en fazla atıf alan ve veri tabanlarında en çok indekslenen çerçeve olması nedeniyle Endüstri 4.0 terimi kullanılmaya devam edilmiştir. Bu kullanım, aynı zamanda literatürdeki kavramsal evrimi değerlendirmek ve Endüstri 4.0’ın günümüzde nasıl yeniden tanımlandığını ortaya koymak açısından da analitik bir avantaj sunmaktadır. Çalışma bulgularının, üretim sistemlerinde dijitalleşme ve sürdürülebilirliğin birlikte uygulanmasına yönelik yaklaşımlara katkı sağlaması beklenmektedir.

Bu çalışma 4 bölümden oluşmaktadır. 2. Bölüm literatür taramasını, 4. ve 5. Bölüm sırayla uygulama ve bulgular ve tartışma ve sonuç kısımlarını içermektedir.

2. Dijitalleşme ve Sürdürülebilirlik İlişkisine Yönelik Literatür Taraması

Üretim yönetimi perspektifinden dijitalleşme ve sürdürülebilirlik konularını birlikte ele alan yazın incelendiğinde, dijitalleşen üretim sistemlerini ifade etmek için Endüstri 4.0 teriminin yaygın olarak kullanıldığı ortaya konmuştur. Kavramların entegrasyonu ilk olarak kullanan çalışmaların 2015 yılında gerçekleştirildiği ortaya konmuştur. Bu bölümde 2015-2025 yılları arasında dijitalleşme ve sürdürülebilirlik ilişkisini doğrudan araştıran çalışmalar incelenmiştir.

Dördüncü Endüstri Devrimi ve sürdürülebilir üretim ile ilgili temel çalışmalardan biri olan de Sousa Jabbour ve diğerlerinin (2018) çalışmasında Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik ayrılmaz bir bütün olarak nitelendirilmiştir. Bahsedilen çalışmada sürdürülebilirliğin üç boyutundan sadece çevre konusuna odaklanılmıştır ve Endüstri 4.0 teknolojilerinin üretim sistemi ve tedarik zinciri ortaklarından gerçek zamanlı veri elde etmeye olanak sağlayan yapısının, etkin kaynak kullanımı ve dağılımına olanak verdiği ve böylelikle sürdürülebilir üretime katkı sağladığı ortaya konmuştur (de Sousa Jabbour ve diğ., 2018). Sürdürülebilirliğin çevre boyutu üzerinde duran bir başka çalışma ise Niehoff ve Beier (2018) tarafından gerçekleştirilmiştir. Dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik üzerinde olumlu etkileri olduğunu savunan yazarlar, özellikle, Endüstri 4.0 teknolojileri ve dijital fabrikaların kaynak etkinliği ve yenilenebilir enerji üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koymuşlardır.

Endüstri 4.0’ın sürdürülebilirliğin tüm boyutları üzerindeki etkisini Endüstri 4.0’a geçiş yapmış bir üretim firmasında gerçekleştirdikleri vaka çalışması ile inceleyen Braccini ve Marherita (2019). Endüstri 4.0’a geçişin ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağladığını ortaya koymuşlardır. Endüstri 4.0’ın sürdürülebilir sanayi değeri yaratma konusunda önemli bir adım olduğunu savunan Carvalho ve diğerleri (2018), Endüstri 4.0 teknolojileri ile birlikte kapalı devre ürün yaşam döngülerinde ürün, materyal, enerji gibi kaynaklarının daha iyi yönetimiyle çevresel anlamda faydalar sağlanacağını, geri dönüşüm ve yeniden üretim gibi çevresel üretim altında olan faaliyetlerin artacağını belirtmişlerdir. Çalışmada yazarlar, Endüstri 4.0’ın temel prensipleri olarak nitelendirilen; birlikte çalışılabilirlik, merkezi yapıda olmama, sanallaştırma, gerçek zamanlı yetkinlikler, modülerlik ve hizmet oryantasyonu konularının sürdürülebilirlik üzerindeki katkılarını incelemişlerdir.

İlgili yazın incelendiğinde, kimi çalışmalarda sürdürülebilirlik ile döngüsel ekonomi kavramlarının birlikte araştırıldığı gözlemlenmiştir (Bressanelli, Adrodegari ve diğ., 2018; Garcia-Muiña ve diğ., 2018; Lopes de Sousa Jabbour ve diğ., 2018; Stock ve Seliger, 2016; Tseng ve diğ., 2018; Cuevas-Pichardo ve diğ.;

2024). Örneğin, Stock ve Seliger (2016), sürdürülebilirlik odaklı, merkezi yapıda olmayan akıllı fabrikalarda, döngüsel ekonomiye ulaşabilmek için, siber fiziksel sistemlerin dinamik kısıtlarını da göz önünde bulundurarak etkin kaynak dağılımı ve kullanımı gerçekleştirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomiyi bir madalyonun iki ayrı yüzü olmaya aday kavramlar olarak ifade eden Garcia-Muiña ve diğerleri (2018), dijital teknolojilerin imalat sektöründe doğrusal ekonomiden döngüsel ekfonomiye geçişe olanak sağlayacağını savunmuşlardır. Döngüsel ekonomi için sürdürülebilir kalkınmanın ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlarının nesnelerin interneti ve sensörler ile sağlanabileceğinin belirtilmiştir. Nesnelerin internetinin kaynakların verimli kullanılması, yeniden kullanım, yeniden imalat gibi konularda çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğe, çalışma koşullarını iyileştirmesi ve daha güvenli hale getirmesi açısından sosyal sürdürülebilirliğe katkı sağlaması beklenmektedir. Sensörler yardımı ile ise üretim süreçlerinin sürekli izlenmesi, kaynak etkinliğinin artırılması ve çalışanların kontrol edilmesi ile sürdürülebilir kalkınmaya, dolayısıyla döngüsel ekonomiye fayda sağlanabileceği sunulmuştur. Yapılan çalışmada Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanıldığı bir yeni döngüsel işletme model önerisi ortaya konmuştur.

Döngüsel ekonomi ile Endüstri 4.0'ın kesişiminin büyük veri ile sağlanacağını savunan Tseng ve diğerleri (2018), sürdürülebilirliğinin üç boyutu olan ekonomik, sosyal ve çevresel perspektiflerin de büyük veriden faydalanarak endüstriyel gelişime katkı sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi konularını bir arada inceleyen bir başka çalışma olarak Lopes de Sousa Jabbour ve diğerleri (2018) olarak gösterilebilir. Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomiyi bütünleştirmek için beş aşamalı bir yol haritası sunan yazarlar Endüstri 4.0 teknolojileri ile döngüsel ekonomi prensipleri için gerekli yönetsel eylemleri birleştirmişlerdir.

Bressanelli ve diğerleri (2018), Endüstri 4.0'ın dijital teknolojilerinden Nesnelerin İnterneti ve Büyük Veri & Analitiği ile ilgili 8 işlevselliğin, döngüsel ekonominin 3 değer yaratan ögesi ile ilişkisini incelemişlerdir. Bu göre dijital teknoloji işlevsellikleri sırasıyla; ürün tasarımı geliştirmek, hedef müşterileri etkilemek, ürün aktivitelerini izlemek ve takip etmek, teknik destek sağlamak, tahmin edici ve önleyici bakım sunmak, ürün kullanımını optimize etmek, ürünü bir üst modele geliştirmek ve yenilemek ve ürün yaşam sonu aktivitelerini arttırmak olarak belirtilmiştir. Döngüsel ekonomide değer yaratan ögeler ise kaynak verimliliğini arttırmak, yaşam süresini uzatmak ve kapalı döngüye geçiş yapmak olarak sıralanmıştır. Yapılan çalışmada Nesnelerin İnterneti ve Büyük Veri & Analitiği teknolojilerinin, bahsedilen 8 işlevden hangilerini gerçekleştirmeye destek olduğu, bunu yaparak hangi döngüsel ekonomi değer yaratma ögesini karşıladığı ve ürün yaşam döngüsünün hangi aşamasında bu ilişkinin gerçekleştiği ortaya konmuştur.

Cuevas-Pichardo ve diğerleri (2024) ise döngüsel ekonominin Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik performansı arasındaki aracı rolünü üretim sektörü özelinde araştırmıştır. Çalışma sonucunda kavramlar arasında anlamlı ve güçlü bir ilişki ortaya konmuştur.

Endüstri 4.0 ile birlikte değişen üretim ve işletme yapılarının sürdürülebilirlik ile ilişkisini ortaya koyan iş model önerilerine ilgili yazında bir diğer önemli alan olarak yer almaktadır (Prause, 2017; Stiel ve Teuteberg, 2015). Endüstri 4.0'da sürdürülebilir iş modelinin dört boyutu olduğunu savunan Stiel ve Teuteberg (2015), bu boyutları sırasıyla; değer yaratma sürecine destek olan iş modelleri, yeni teknolojilerin etkisini tanımlamak için strateji ve inovasyon dereceleri, kurumsal sürdürülebilirliğe geçiş için kullanılacak işletme sürdürülebilirliği modelleri ve son olarak akıllı erişim noktaları olarak sunmuştur.

Sürdürülebilirlik bağlamında Endüstri 4.0'ın fırsatlarını ve zorluklarını değerlendiren Müller ve diğ., (2018) bu fırsatları ve zorlukları altı başlık olarak özetlemiştir. Bu başlıklar sırasıyla; strateji, operasyonlar, çevre ve insan, nesnelerin interneti ile ilgili zorluklar, rekabet edebilirlik ve gelecekte varlığını sürdürebilme, organizasyon ve üretim uyumu ve son olarak, çalışan yetkinlikleri ve kabulüdür. Stock ve Seliger (2016), sürdürülebilir üretimin Endüstri 4.0'daki faydalarını makro ve mikro olmak üzere ikiye ayırmıştır. Makro faydalar işletme modelleri ve değer yaratma ağları olarak iki alt başlıkta incelenmiştir. Aynı çalışmada Endüstri 4.0'da sürdürülebilir üretimin mikro faydaları ise insan, organizasyon, süreç ve ürün olmak üzere dört alt başlık altında sunulmuştur.

Benzer şekilde Habib ve Chimson (2019) Endüstri 4.0 tasarım prensipleri ile sürdürülebilirlik elementlerini birleştirmiş ve sürdürülebilir tasarım prensipleri ortaya koymuştur. Tasarım hedeflerine ulaşmak için, Endüstri 4.0 sistemlerinin birlikte çalışabilir, kolayca sanallaştırılabilir, merkezi olmayan, gerçek zamanlı işleme yeteneğine sahip olması gerektiği ve bu kavramların Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ile entegre edilmesi gerektiği sunulmuştur.

Akıllı üretim sistemlerinin sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini makine üretim endüstrisinde inceleyen Waibel ve diğerleri (2018) akıllı işlevselliğe sahip teknik gelişmelerin sürdürülebilirlik faydalarını

değerlendirmişlerdir. Buna göre yenilikler/teknolojik gelişmelerin sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Yapılan çalışma sonucunda Endüstri 4.0 çerçevesi içerisinde akıllı süreçlerin sürdürülebilirlik üzerinde olumlu etkileri olduğu, ancak artan taleplerle birlikte kaynak kullanımı ve çevresel etkilerin üzerinde daha çok durulması gerektiği belirtilmiştir.

Ülkelerin Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde benimsedikleri stratejiler sürdürülebilirlik bağlamında değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin, Lin ve diğerleri (2017), Çin ve Tayvan'ın sürdürülebilirlik gelişim kapsamında Endüstri 4.0 geçişindeki önceliklerini incelemiş ve stratejik olarak bu ülkelerin farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Yapılan çalışmanın sonucuna göre, her iki ülkenin de çevresel politikalarında siyasi ve mevzuat özelliklerini ön planda tuttuğu ancak Tayvan'ın ek olarak tedarikçilerle ilgili politikalarda eğitim ve alıştırma konularına da odaklandığı ortaya konmuştur.

Beier ve diğerleri (2017) ise endüstriyel dijitalleşmenin üretim firmalarındaki sürdürülebilirliğe etkisini birbirlerinden çok farklı endüstriyel yapılara sahip olan Almanya ve Çin'deki üretim firmalarının katıldığı bir anket çalışmasıyla araştırmışlardır. Çalışma sonucunda sürdürülebilirlik ile ilgili olarak gelecekte iş yapıları, gelecekteki üretim yapısı ve kaynak kullanımı ve koruması ile ilgili ülkelerin benzerlikleri ve farklılıkları ortaya konmuştur.

Verma ve diğerleri (2022) ise Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirlik üzerindeki uzun dönem etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda sürdürülebilirlik faktörleri ve Endüstri 4.0'ın üretim sistemlerinde yaratabileceği zorluklar değerlendirilmiştir. Agarwal ve diğerleri (2022) ise çevik üretimde Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir kalkınma üzerindeki rolünü araştırmışlardır. Yapılan çalışmada çevik stratejiler kapsamında, dayanıklılık, teknolojik kabiliyetler ve müşteri odaklı yenilikçilik en belirgin yaklaşımlar olarak öne çıkmıştır.

Literatürde, Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik ilişkisini tedarik zinciri boyutunda inceleyen çalışmalar da bulunmaktadır (Gružauskas ve diğ., 2018; Luthra ve Mangla, 2018). Örneğin Gružauskas ve diğerleri (2018), tedarik zincirlerinde Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanımının azlığından yola çıkarak sürdürülebilirliğin ve optimal maliyetlerin entegre olduğu bir rekabet stratejisi üzerinde çalışmışlardır. Geleneksel tedarik zinciri yapısında sürdürülebilir tedarik zincire geçişin gerekliliğini savunan yazarlar; nesnelerin interneti, büyük veri analitiği, bulut teknolojileri, otonom araçlar ve siber fiziksel sistemler gibi teknolojilerin bu geçişe katkı sağlayacağını savunmuşlardır.

Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik ilişkisini inceleyen bir başka çalışma ise Luthra ve Kumar (2018) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı geliştirmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'ın kilit zorlayıcı yanlarının tedarik zinciri sürdürülebilirliği üzerindeki etkileri analiz etmektir. Keşfedici faktör analizi ve AHP yöntemlerinin birlikte kullanıldığı çalışma Hindistan'daki farklı endüstrilerden katılımcılarla gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlara doğrultusunda yazarlar, süreç mühendisleri ve endüstriyel yöneticilerin sürdürülebilir işletme geliştirebilmek için tasarım, operasyon ve süreçlerin kontrolü ve optimizasyonu konularına önem vermeleri gerektiğini önermişlerdir.

İlgili yazın incelendiğinde Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini araştırıldığı çalışmalara rastlanmaktadır (Dubey ve diğ., 2016; Song ve Moon, 2017). Örneğin Dubey ve diğerleri (2016) ise Endüstri 4.0'ın en temel teknolojilerinden biri olan büyük verinin dünya standartlarında sürdürülebilir üretim üzerindeki etkisi üzerinde durmuştur. Çalışmada büyük veri odağında liderlik, tedarikçi ilişkileri yönetimi, mevzuat baskıları, çalışan katılımı, müşteri ilişkileri yönetimi, toplam kalite yönetimi, toplam üretken bakım ve yalın üretim konularının çevresel, sosyal ve ekonomik performans üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Endüstri 4.0'ın bir diğer yapı taşı olan siber üretim sistemlerin, sürdürülebilirlik faydalarını çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan inceleyen Song ve Moon (2017) sürdürülebilirliğin tüm boyutları için göstergeler belirleyip örnek bir teknoloji üzerinde değerlendirme yapmıştır. Bu çalışmada siber üretim sistemlerin yeni bir drone üretiminde kullanılmasının simülasyon yöntemi uygulanarak sürdürülebilirlik etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda siber üretim sistemleri kullanımının çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik alanında olumlu etkileri olduğu ortaya konmuştur.

Endüstri 4.0'ın yeni üretim sistemleri ile verimliliği artırması sürdürülebilirliğin ekonomik boyutunu geliştirmektedir. Endüstri 4.0 ve ekonomik sürdürülebilirlik konusundaki bu olumlu çıkarımlar bazı yazarları sadece çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik boyutlarının Endüstri 4.0 ile ilişkisini araştırmaya yöneltmiştir (Dubey ve diğ., 2017; Gabriel ve diğ., 2016; Stock ve diğ., 2018). Örneğin, Dubey ve diğerleri (2017) büyük veri ve kestirimsel analitiğin sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda örgütsel yetkinlik olarak büyük veri ve kestirimsel analitiğin sosyal ve çevresel performans üzerinde önemli etkileri olduğu ortaya konmuştur. Benzer bir başka çalışmada, Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir değer yaratımı ile ilgili yazında bütüncül kalitatif

değerlendirmelerin eksik olduğunu savunan Stock ve diğerleri (2018), bu açığı kapatmak için çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik konularına odaklanarak Endüstri 4.0'ın makro ve mikro sürdürülebilir değerler yaratımı konusundaki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda enerji tüketimi ve materyal tüketiminin çevresel sürdürülebilirlikle ilgili değer yaratımı konusunda kritik konular olduğu; çalışma koşullarının ise sosyal sürdürülebilirlik açısından kritik önem taşıdığı ortaya konmuştur.

Endüstri 4.0'ın sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik üzerine etkilerini araştıran bir başka çalışma ise Gabriel ve Pessl (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. Sosyal sürdürülebilirlik altında iş yaşamını ve istihdamı araştıran yazarlar, küçük ve orta büyüklükteki işletmelere odaklanmışlardır. Brozzi ve diğerleri (2020) ise üretim işletmelerinin özelliklerine göre Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirlik boyutları üzerindeki etkilerinin farklılık gösterdiğini, bazı işletmelerin daha çok ekonomik fayda gözetirken, diğerlerinin çalışan refahı ve çevresel sürdürülebilirlik ile ilgili çıktılarına odaklandığını ortaya koymuştur.

İlgili yazında risk odaklı olarak Endüstri 4.0 ile ilişkili riskleri sürdürülebilirliğin 3 boyutu ile ilişkilendiren Birkel ve diğerleri (2019), Endüstri 4.0 sürdürülebilir risk modeli ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışmaya göre riskler sürdürülebilirlik boyutları altında gruplandırılmıştır. Özet olarak ekonomik riskler; yüksek ya da yanlış yatırımlar, artan rekabet, pazara yeni giren rakipler nedeniyle değişen iş modelleri olarak sıralanmıştır. Ekolojik riskler ise atıkların ve enerji kullanımının artması, özel üretimler olarak nitelendirilmiştir. Sosyal sürdürülebilirlik ile ilgili olarak ise iş kayıpları, örgütsel değişim, çalışanlardan değişen beklentiler ve değişme direnç gösterilmiştir. Sürdürülebilirlik boyutlarının yanı sıra teknik riskler ve yasal riskler de sunulan modele eklenmiştir.

Bai ve diğerleri (2020) sürdürülebilir kalkınma amaçları ile ilişkili olarak Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirlik performansını ölçmeye yönelik bir çerçeve önerisi sunmuşlardır. Çalışmanın sonunda mobil teknolojinin tüm endüstrilerde sürdürülebilirlik üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu, öte yandan nanoteknoloji, mobil teknoloji, simülasyon ve dronların sürdürülebilirlik üzerinde sırasıyla otomotiv, elektronik, gıda ve tekstil sektörlerinde en yüksek etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur.

Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirlik fonksiyonları üzerinde duran Ghobakhloo (2020), üretim verimliliği ve işletme modeli inovasyonu gibi ekonomik sürdürülebilirlik konularının Endüstri 4.0'ın daha hızlı sonuç veren çıktıları olduğunu, sosyal ve çevresel fonksiyonların ise daha dolaylı olarak sağlandığını savunmuşlardır. Turkcan (2025) ise yeşil ürün geliştirme ve dijital dönüşümün sürdürülebilir üretim ve finansal performans üzerindeki etkisini araştırmıştır.

Yadav ve diğerleri (2020) Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirlik üzerindeki etkisine gelişmekte olan ülkeler perspektifinden yaklaşmışlardır. Otomotiv sektörü özelinde gerçekleştirilen uygulamada yönetimsel, ekonomik ve çevresel faktörlerin, sürdürülebilirliğin benimsenmesinde güçlü katkıya sahip olduğu ortaya konmuştur. Benzer şekilde Sharma ve diğerleri (2021) gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'ın çok katmanlı tedarik zincirleri üzerindeki etkisini araştırmış, bu bağlamda teknoloji, organizasyon, ekonomik, çevre ve sosyal başlıkları altında birbirleri ile ilişkili itici güçleri ve zorlukları ortaya konmuştur.

Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik ilişkisinin kavramsal olarak incelenmesi detaylı literatür taramaları ve bibliyometrik analizler ile mümkün olmaktadır. Bu bağlamda, Furstenau ve diğerleri (2020), Sharma ve diğerleri (2020), Ghobakhloo ve diğerleri (2021), Tavares-Lehmann ve Varum (2021) ve Tomaschko ve diğerleri (2024) benzer çalışmalar gerçekleştirerek Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik ilişkisine yönelik yazın taraması gerçekleştirmişlerdir ve geleceğe dönük araştırma konuları sunmuşlardır. Farklı olarak Ghobakhloo ve diğerleri (2021) dijitalleşme kavramının, Tavares-Lehmann ve Varum (2021) ise döngüsel ekonomi kavramının üzerinde durmuştur. Beier ve diğerleri ise (2020) konu ile ilgili literatür taraması yapmakla birlikte Endüstri 4.0'ı sosyoteknik açıdan incelemişlerdir ve sürdürülebilirlik ile ilgili ilişkisini ortaya koymuşlardır. Birkel ve Müller (2021) ise Endüstri 4.0'ın tedarik zinciri yönetimi üzerindeki etkilerini sistematik literatür taraması ile araştırmış ve sürdürülebilirliğin üç ayağı çerçevesinde araştırma konu önerileri sunmuştur. Dijitalleşme ve sürdürülebilirliğe yönelik gerçekleştirilen yazın taraması Tablo 1'de sunulmuştur.

Yazar(lar)	Amaç/Odak Noktası	Yöntem	Sonuç
Stiel ve Teuteberg (2015)	Sürdürülebilir toplumda Endüstri 4.0 iş modellerinin fırsatları, yeterlilikleri ve zorlukları	Yapılandırılmış literatür taraması ve uzman görüşmeleri	Dört aşamalı sürdürülebilir iş modeli çerçevesi önerisi sunulmuştur.
Dubey ve diğerleri (2016)	Büyük veri analitiğinin dünya standartlarında sürdürülebilir üretim üzerindeki rolünü ortaya koymak	Sosyal ağ sitelerinde anket	Kavramsal çerçeve önerisi sunulmuştur, toplanan veriler kullanarak model test edilmiştir ve akademik ve uygulama anlamında önemli konular belirlenmiştir.
Gabriel ve Pessl (2016)	Endüstri 4.0'ın küçük ve orta büyüklükteki işletmelerde sosyal ve çevresel sürdürülebilirliğe etkisi	Anket	Endüstri 4.0'ın, sosyal sürdürülebilirlik altında, çalışanların iş profilleri üzerinde etkileri olacağı ancak insana olan ihtiyacın baki kalacağı ve Endüstri 4.0 teknolojilerinin kaynak ve enerji kullanımı konusunda olumlu etkilerinin olacağı böylece çevresel sürdürülebilirliği destekleyeceği ortaya konmuştur.
Stock ve Seliger (2016)	Endüstri 4.0'da sürdürülebilir üretimin yarattığı fırsatların ortaya konması	Literatür taraması	Sürdürülebilir üretimin makro ve mikro açıdan faydaları sunulmuştur. Makro konular iş modelleri ve değer yaratma ağlarını; mikro model ise insan, organizasyon, süreç ve ürün konularını içermektedir.
Beier ve diğerleri (2017)	Endüstriyel dijitalleşmenin sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerinin araştırılması	Anket	Endüstriyel dijitalleşme çevresel sürdürülebilirliği olumlu yönde etkilemektedir. Ancak değişen iş profilleri nedeniyle sosyal sürdürülebilirlik konusu daha kritik ile ilgili olarak daha kritik
Dubey ve diğerleri (2017)	Büyük veri ve kestirimsel analitiğin sosyal ve çevresel	Anket	Büyük veri ve kestirimsel analitiğin sosyal ve çevresel performans üzerinde önemli etkileri olduğu ortaya konmuştur.

	performans üzerindeki etkilerinin araştırılması		
Lin ve diğerleri (2017)	Endüstri 4.0'da sürdürülebilir kalkınma için yenilik gereksinimleri ve ülkeler arası karşılaştırmalı politika analizi yaparak politika önerileri sunmak	İçerik analizi yöntemi	Çalışmada Çin ve Tayvan'ın politika geliştirmeleri karşılaştırılmıştır. Çin'in çevre politikası konusunda yasal ve siyasal konulara odaklandığı ayrıca kamu hizmeti ve taleple ilgili politikaların ön plana çıktığı; Tayvan'ın ise çevre politikalarının yanı sıra tedarik ile ilgili politikalarda eğitim ve öğretim konularına odaklandığı ortaya çıkmıştır.
Prause (2017)	Endüstri 4.0'da sürdürülebilir iş modeli ve e-vatandaşlık örneği	Uzman mülakatları, vaka analizi ve literatür taraması	Yeniliğe açık modeller, hizmet tasarım modelleri ve Endüstri 4.0 için e-vatandaşlık kavramı yeni iş modelleri olarak sunulmuştur.
Song and Moon (2017)	Siber üretim sistemlerinin sürdürülebilirlik ile ilgili faydalarının değerlendirilmesi	Benzetim modeli	Çevre, sosyal ve ekonomik açıdan sürdürülebilirlik göstergeleri belirlenmiş ve benzetim modelleri kullanılarak siber üretim sistemlerinin sürdürülebilirlik faydaları araştırılmıştır. Sonuç olarak sürdürülebilirlik açısından siber üretim sistemlerinin geleneksel üretim sistemlerinden daha umut verdiği ortaya konmuştur.
Bressanelli ve diğerleri (2018)	Nesnelerin İnterneti ve Büyük Veri Analitiğinin döngüsel ekonomi üzerindeki etkilerini araştırmak	Literatür Taraması ve Vaka Çalışması	Nesnelerin İnterneti ve Büyük Veri & Analitiği teknolojilerinin, işlevselliklerden hangilerini gerçekleştirmeye destek olduğu, bunu yaparak hangi döngüsel ekonomi değer yaratma ögesini karşıladığı ve ürün yaşam döngüsünün hangi aşamasında bu ilişkinin gerçekleştiği ortaya konmuştur.

Carvalho ve diğerleri (2018)	Endüstri 4.0 prensiplerinin sürdürülebilirliğe katkısının araştırılması	Tartışma	Birlikte çalışılabilirlik, merkezi yapıda olmama, sanallaştırma, gerçek zamanlı yetkinlikler, modülerlik ve hizmet oryantasyonu konularını sürdürülebilir endüstriyel değer sağlamaya yardımcı olmaktadır.
De Sousa Jabbour ve diğerleri (2018)	Çevresel sürdürülebilir üretim ve Endüstri 4.0'ın bütünleştirilmesi	Literatür taraması	Endüstri 4.0 ve çevresel sürdürülebilir üretim entegrasyonu için 12 kritik başarı faktörü ortaya konmuştur ve gelecek çalışmalar ortaya konulan kritik başarı faktörleri ile ilgili 11 adet araştırma konusu sunulmuştur.
Gružauskas ve diğerleri (2018)	Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirlik ve maliyet verimliliği arasındaki mübadele üzerindeki etkisini araştırmak	Vaka çalışması ve simülasyon	Endüstri 4.0 teknolojileri ile sürdürülebilirlik sağlanırken maliyetlerin düşürülebileceği ortaya konmuştur. Otonom araçlar için yapılan uygulamada CO2 emisyonu %22 azalmış, maliyetler düşmüştür.
Garcia-Muiña ve diğerleri (2018)	Döngüsel ekonomi ve Endüstri 4.0 paradigmasının ilişkisinin incelenmesi	Vaka çalışması	Endüstri 4.0 teknolojileri kullanılarak döngüsel işletme modeli sunulmuştur.
Lopes de Sousa Jabbour ve diğerleri (2018)	Döngüsel ekonomi ve Endüstri 4.0'ın bütünleştirilmesi	Literatür taraması	Akıllı üretim teknolojilerinin ReSOLVE döngüsel ekonomi modeli ile ilişkisini ortaya koyulmuştur ve gelecek teorik çalışmalar için konu önerileri sunulmuştur.
Luthra ve Mangla (2018)	Gelişmekte olan ekonomilerde Endüstri 4.0 zorluklarının tedarik zinciri sürdürülebilirliğine etkisinin araştırılması	Keşfedici faktör analizi ve AHP	Tedarik zinciri sürdürülebilirliğini etkileyen zorluklar en yüksekten başlayarak organizasyonel, yasal ve etik, stratejik ve teknolojik olarak sıralanmıştır.
Müller and Voigt (2018)	Sürdürülebilirlik bağlamında Endüstri 4.0'ın fırsatlarının ve	Yapısal eşitlik tabanlı kısmi en	Stratejik, operasyonel, çevresel ve sosyal faktörler Endüstri 4.0 uygulamalarının fırsatları olarak

	zorluklarının araştırılması	küçük kareler metodu	sunulmuştur. Rekabetçilik, gelecekte varlığını sürdürme, organizasyon ve üretim uyumu, çalışan vasfı ve kabulü gibi faktörler ise Endüstri 4.0 uygulamalarının olası zorlukları olarak ortaya konmuştur.
Niehoff ve Beier (2018)	Çevresel sürdürülebilirlik	Anket ve yarı yapılandırılmış görüşme	Dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlik üzerinde olumlu etkisi olabileceği ortaya konmuştur.
Stock ve diğerleri (2018)	Sosyal ve çevresel sürdürülebilir kalkınmada Endüstri 4.0'ın rolü	Literatür taraması ve uzman görüşmeleri	Enerji tüketimi, materyal tüketimi ve çalışma koşulları sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik açısından değer yaratımı konusunda kritik öneme sahip olduğu ortaya konmuştur.
Waibel ve diğerleri (2018)	Makine üretim endüstrisinde, akıllı üretim süreçlerinin sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerinin araştırılması	Anket	Akıllı üretim süreçlerinin çevresel sürdürülebilirlik üzerinde olumlu etkileri bulunmaktadır.
Birkel ve diğerleri (2019)	Sürdürülebilirlik açısından Endüstri 4.0 risk modeli sunulması	Literatür Taraması ve Derinlemesine Görüşme	Ekonomik, sosyal, yasal, ekolojik ve teknik riskler içeren Endüstri 4.0 sürdürülebilir risk modeli ortaya konmuştur.
Braccini ve Margherita (2019)	Endüstri 4.0'ın işletme sürdürülebilirliği üzerindeki etkisinin sürdürülebilirliğin 3 boyutu açısından değerlendirilmesi	Vaka Çalışması	Endüstri 4.0 uygulamalarının üretkenlik ve ürün kalitesini iyileştirerek ekonomik sürdürülebilirliğe, enerji kullanımı ve atıkları azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe, güvenli ve bilgi odaklı çalışma ortamı sağlayarak sosyal sürdürülebilirliğe katkı sağladığı ortaya konmuştur.
Habib ve Chimson (2019)	Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirliğin SKA kapsamında değerlendirilmesi	Kavramsal Araştırma	Endüstri 4.0'da sürdürülebilir tasarım prensipleri ortaya konmuştur.
Bai ve diğerleri (2020)	Sürdürülebilirlik uygulamalarında	VIKOR	Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirlik performansını

	Endüstri 4.0 teknolojilerinin rolünün araştırılması		değerlendirmeye olanak sağlayan bir yöntem geliştirilmiştir.
Beier ve diğerleri (2020)	Sosyoteknik açıdan Endüstri 4.0'ı tanımlamak	Literatür Taraması	Endüstri 4.0'ın sosyoteknik açıdan tanımlaması yapılmış ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine olan katkısı ortaya konmuştur.
Brozzi ve diğerleri (2020)	Endüstri 4.0'ın üretim sektöründe sürdürülebilirlik avantajlarını araştırmak	Anket	İşletmelerin büyüklüğüne, finansal durumuna ve dijitalleşme düzeyine göre Endüstri 4.0'dan sosyal, ekonomik ve çevresel beklentilerin değiştiği ortaya konmuştur.
Furstenau ve diğerleri (2020)	Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişkinin incelenmesi	Bibliyometrik Performans ve Ağ Analizi	Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik arasındaki mevcut ilişki ve araştırma alanları ortaya konmuştur.
Ghobakhloo (2020)	Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirlik fonksiyonlarını ortaya koymak	Yorumlayıcı Yapısal Modelleme (ISM)	Endüstri 4.0'ın ekonomik sürdürülebilirlik fonksiyonu açısından en hızlı çıktıları sağlayacağı, bu durumun sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik fonksiyonlarını destekleyeceği ortaya konmuştur.
Sharma ve diğerleri (2020)	Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir üretim üzerindeki etkilerini araştırmak	Bibliyometrik Analiz	Endüstri 4.0 ve sürdürülebilir üretim ile ilgili araştırma konularını içeren yol haritası sunulmuştur.
Yadav ve diğerleri (2020)	Gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0 dönüşümünün sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini araştırmak	Robust Best Worst Yöntemi	Yönetimsel, ekonomik ve çevresel faktörlerin, sürdürülebilirliğin benimsenmesinde güçlü katkıya sahip olduğu ortaya konmuştur.
Birkel ve Müller (2021)	Endüstri 4.0'ın tedarik zinciri yönetimi üzerindeki etkilerini TBL açısından araştırmak	Sistemik Literatür Taraması	Tedarik zinciri yönetiminde Endüstri 4.0'ın rolü TBL açısından araştırılmış, geleceğe yönelik araştırma konu önerileri sunulmuştur.

Ghobakhloo ve diğerleri (2021)	Dijitalleşme ve Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirlik ile ilişkisini ortaya koymak	Sistematiik Literatür Taraması	Endüstri 4.0 dönüşümünün özellikle imalat-ekonomik kalkınma ile ilgili olarak, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin acil sorunlarını ele alması gerektiği ortaya konmuştur.
Tavares-Lehmann ve Varum (2021)	Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik ilişkisinin bibliyometrik analizinin yapılması	Bibliyometrik Literatür Taraması	Bibliyometrik literatür taraması ile Endüstri 4.0, sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi arasındaki bağlantılar ortaya konmuştur.
Sharma ve diğerleri (2021)	Endüstri 4.0'ın çok katmanlı tedarik zincirlerindeki etkisini araştırmak	AHP ve DEMATEL	Gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'ın çok katmanlı tedarik zincirlerindeki itici güçleri ve bariyerleri ortaya konmuştur.
Agarwal ve diğerleri (2022)	Çevik üretimde Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir kalkınma üzerindeki rolünü araştırmak	Bulanık DELPHI ve TOPSIS	Çevik stratejiler kapsamında, dayanıklılık, teknolojik kabiliyetler ve müşteri odaklı yenilikçilik en belirgin yaklaşımlar olarak öne çıkmıştır
Verma ve diğerleri (2022)	Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir dijital üretim sistemlerindeki etkisini araştırmak	Sistematiik Literatür Taraması ve AHP	Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir üretim üzerinde yarattığı kısıtlar ortaya konmuş ve değerlendirilmiştir.
Qureshi ve diğerleri (2023)	Tedarik zincirlerinde Endüstri 4.0 teknolojilerinin etkilerini araştırmak	Kısmi En Küçük Kareler Yapısal Eşitlik Modellemesi	Endüstri 4.0 teknolojilerinin süreç inovasyonu ve sürdürülebilir üretim üzerinde olumlu yönde etkileri olduğu ortaya konmuştur.
Cuevas-Pichardo ve diğerleri (2024)	Döngüsel ekonominin Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik performansı arasındaki aracı rolünü araştırmak	Kısmi En Küçük Kareler Yapısal Eşitlik Modellemesi	Döngüsel ekonomi, Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişki ortaya konmuştur.
Tomaschko ve diğerleri (2024)	Üretim sistemlerinde dijital teknolojilerinin sürdürülebilirliğini araştırmak	Sistematiik Literatür Taraması	Mevcut literatürde ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik bağlantısının eksik olduğu ortaya konmuştur.
Turkcan (2025)	Dijital dönüşümün sürdürülebilir üretim ve finansal performans	Anket	Sürdürülebilir üretim uygulamalarının yeşil ürün geliştirme üzerinde etkili olduğunu

	arasındaki aracı rolünü araştırmak		ve dijital dönüşümün aracılık rolü üstlendiğini ortaya konmuştur.
--	------------------------------------	--	---

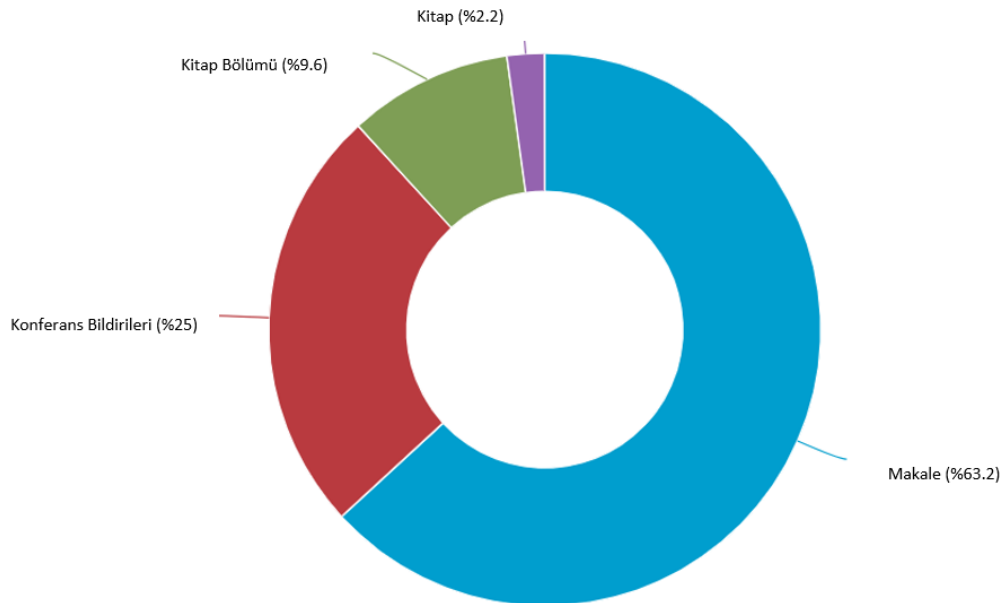
Tablo 1. Dördüncü Endüstri Devrimi ve Sürdürülebilirlik Yazın Taraması Özeti

Literatür taraması sonucunda dijitalleşme ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi araştıran çalışmaların giderek artmakta olduğu ancak fiziksel uygulamalardan çok teorik modellerin ve geleceğe dönük araştırma konusu önerilerinin ön planda olduğu ortaya çıkmıştır. Bu durum, dijitalleşme ve sürdürülebilir üretim arasındaki ilişkinin sistemik bir şekilde araştırılmasına olan gereksinimi ortaya koymaktadır.

3. Uygulama ve Bulgular

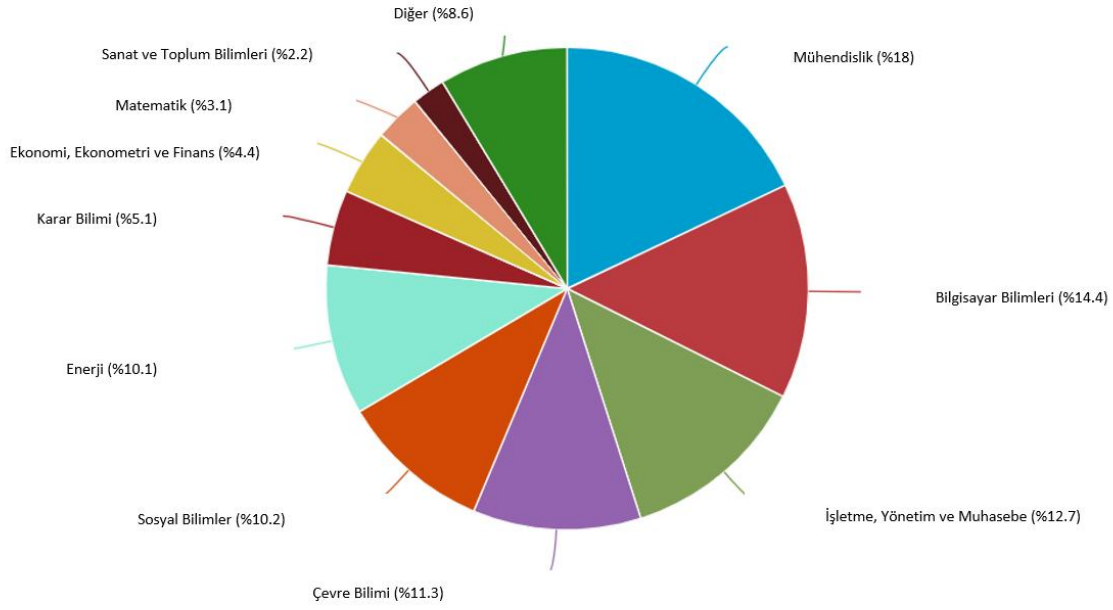
Bu çalışmada gerçekleştirilen detaylı literatür taramasına ek olarak sonuçların görselleştirilebilmesi ve 2015-2025 yılları arasında dijitalleşme ve sürdürülebilirlik konularını birlikte araştıran ve üretim süreçleri ile ilgili olan çalışmaların ana temalarının sistematik olarak sunulabilmesi için bibliyometrik analiz yöntemine başvurulmuştur.

Bibliyometrik analiz, bilimsel literatürün yapısal özelliklerini ve etkileşimlerini sayısal yöntemlerle inceleyen bir yöntemdir. Bu analiz, anahtar kelime kullanımları, yayın sayıları, atıf verileri ve yazar iş birlikleri gibi ölçütleri kullanarak araştırma trendlerini, bilimsel etkiyi ve iş birliği ağlarını ortaya çıkarır. Bu çalışmada anahtar kelimelerin birlikte kullanımı Vosviewer yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmanın bibliyometrik veri seti SCOPUS veri tabanında “dijitalleşme”, “Endüstri 4.0”, “dijital” ve “sürdürülebilirlik”, “sürdürülebilir” kelimelerinin çalışma başlıklarında aranarak elde edilmiştir. Çalışmalar 2015-2025 yılları ile sınırlandırılmış ve sadece İngilizce dilindeki çalışmalar analize dahil edilmiştir. Çalışmalar yıllar açısından incelendiğinde özellikle 2021 yılı sonrası yayın sayılarının çok hızlı bir şekilde arttığı, 2024 yılında ise toplamda 118 çalışma ile tepe noktasına ulaştığı gözlemlenmiştir. Analizde yayın tipi olarak makale, kitap, kitap bölümleri ve konferans bildirileri seçilmiştir. Yayın türüne göre dağılım Şekil 2’de sunulmuştur. Buna göre çalışmaların yarısından fazlasını makale türündeki eserler oluşturmaktadır. Bunu %25 ile konferans bildirileri izlemektedir. Kitap bölümleri %9.6’sını, kitaplar ise %2.2’lik dilimleri oluşturmaktadır.



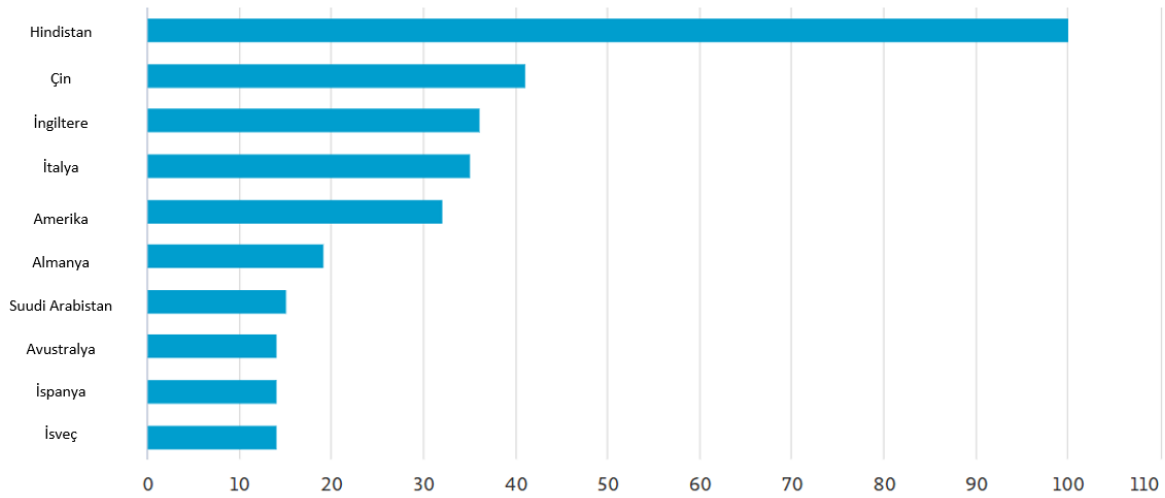
Şekil 1: Yayın Türüne Göre Dağılım Grafiği

Öte yandan çalışmalar SCOPUS çalışma alanlarına göre incelendiğinde Şekil 2’deki grafik ortaya çıkmıştır. Sürdürülebilirlik ve dijitalleşme ile ilgili çalışmaların en çok mühendislik, bilgisayar bilimleri ve işletme alanlarında yapıldığı ortaya konmuştur.



Şekil 2: Çalışma Alanlarına Göre Dağılım Grafiği

Bibliyometrik analize dahil edilen çalışmalar ülkelere göre dağılım açısından incelendiğinde, ilgili alanda en çok yayın yapılan ülkeler sırasıyla Hindistan, Çin ve İngiltere olarak ortaya çıkmıştır. Ükelere göre çalışma sayıları dağılımı seçilen alanda en çok yayın yapılan ilk 10 ülke olarak Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3: Ükelere Göre Dağılım Grafiği

Bibliyometrik kapsamında bir diğer inceleme yıllara göre yayın yapılan kaynaklar üzerine yapılmıştır. İlgili alanda en çok yayın yapılan kaynaklar araştırıldığında 51 yayınla Sustainability Switzerland ve 14 yayınla Journal of Cleaner Production dergileri ön plana çıkmaktadır. En çok yayın yapılan ilk 5 kaynağın grafiği Şekil 4'te sunulmuştur.

Bibliyometrik analiz sonuçları, dijitalleşme ve sürdürülebilirlik temalı akademik literatürün temel araştırma alanlarını belirlemek amacıyla incelenmiştir. Anahtar kelime eşleşme analizine dayalı olarak yapılan kümeleme, alanın temel bileşenlerini temsil eden beş farklı küme ortaya koymaktadır. Bu kümeler, dijital ekonomi ve sürdürülebilirlik (yeşil küme), dijital dönüşüm ve iş modelleri (kırmızı küme), Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi (mor küme), akıllı teknolojiler ve nesnelerin interneti (sarı küme), ile eğitim ve sosyal faktörler (mavi küme) çerçevesinde şekillenmektedir.

Yeşil küme, dijital ekonomi ve sürdürülebilirlik ekseninde şekillenmiş olup, dijital finans, kurumsal sosyal sorumluluk ve iklim değişikliği gibi kavramlarla güçlü ilişkiler sergilemektedir. Bu bulgu, dijital teknolojilerin sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda nasıl yönlendirilebileceğini göstermesi açısından önemlidir. Literatürde, dijitalleşmenin ekonomik büyüme ve çevresel sürdürülebilirlik ile ilişkili olduğu, özellikle yeşil finans ve düşük karbonlu iş modelleri bağlamında incelendiği görülmektedir.

Kırmızı küme, dijital dönüşüm ve iş modelleri konusuna odaklanarak, dijital teknolojilerin organizasyonel yapı ve iş stratejileri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Dijital dönüşüm sürecinde, işletmelerin yenilikçi iş modelleri geliştirme, operasyonel verimlilik sağlama ve sürdürülebilir performans artırma konularına yoğunlaştığı görülmektedir. Bu bağlamda, iş dünyasında rekabet avantajı elde etmek için dijital stratejilerin sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu hale getirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Mor küme, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi ilişkisini ele almakta olup, sürdürülebilir üretim, tedarik zinciri yönetimi ve akıllı üretim gibi kavramlar etrafında şekillenmiştir. Endüstri 4.0 teknolojilerinin, döngüsel ekonomi uygulamalarını destekleyerek kaynak verimliliğini artırdığı ve atık yönetimini optimize ettiği görülmektedir. Özellikle büyük veri, otomasyon ve yapay zekâ gibi dijital çözümler, tedarik zinciri süreçlerini daha sürdürülebilir hale getirme potansiyeline sahiptir.

Sarı küme, akıllı teknolojiler ve IoT konusuna odaklanarak, nesnelerin interneti, dijital ikizler, büyük veri analitiği ve blok zincir gibi yenilikçi teknolojilerin sürdürülebilirlik bağlamında nasıl kullanıldığını göstermektedir. Akıllı şehirler, enerji yönetimi ve altyapı sistemlerinde bu teknolojilerin uygulanması hem kaynak kullanımını optimize etmekte hem de karbon ayak izini azaltmaya katkı sağlamaktadır. Literatürde, bu teknolojilerin sürdürülebilir kalkınma politikalarıyla entegre edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Son olarak, eğitim, sosyal faktörler ve çevresel sürdürülebilirlik üzerine yoğunlaşan mavi küme, eğitim sistemleri, girişimcilik ekosistemleri ve sosyal medya aracılığıyla dijitalleşmenin toplumsal etkilerine odaklanmaktadır. Dijital teknolojilerin eğitim ve farkındalık artırma süreçlerinde kritik bir rol oynadığı, çevre dostu girişimcilik faaliyetlerini teşvik ettiği ve sürdürülebilir kalkınma bilincini yaygınlaştırdığı görülmektedir. Bu kapsamda, akademik literatür, dijital eğitimin ve sosyal medya platformlarının çevresel sürdürülebilirliği destekleyici bir araç olarak nasıl kullanılabileceğini incelemektedir.

Bu analiz, dijitalleşme ve sürdürülebilirlik ekseninde yapılan bilimsel çalışmaların disiplinler arası doğasını vurgulayarak, literatürdeki temel araştırma eğilimlerini anlamak ve gelecekteki çalışmalar için bir çerçeve oluşturmak açısından kritik bir değer taşımaktadır.

4. Sonuç

Yeni üretim paradigmasını şekillendiren dijitalleşme olgusu, işletmeler üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Bununla birlikte, günümüz tüketim toplumunda doğal kaynakların tükenmesi, küresel ısınma, çevre kirliliğindeki artış ve ülkeler arasındaki ekonomik eşitsizlikler ile refah düzeyindeki farklılıkların derinleşmesi, kâr odaklı üretim faaliyetlerinde çevresel ve sosyal sürdürülebilirliğe yönelik farkındalığın artmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, dijitalleşen üretim sistemlerinin sürdürülebilir üretime katkı sunma potansiyeli, dijitalleşme ile sürdürülebilirliğin birbirini destekleyen yapılar olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Diğer yandan, sürdürülebilirliğin işletmeler açısından dikkate alınması gereken bir konu olarak gündeme gelişi 1960'lı yıllara dayansa da, bu kavramın stratejik bir öncelik haline gelmesi özellikle 1990'lı yıllardan itibaren ivme kazanmıştır. Çevresel ve toplumsal dinamiklerdeki değişimlerle birlikte kapsamı genişleyen sürdürülebilir üretim yaklaşımı, temel ilkelerini korurken, dijitalleşme ile ortaya çıkan yeni endüstri devrimi bağlamında gelişen kavramları da bünyesine entegre etmeli ve bu dönüşümle uyumlu hale gelmelidir.

Üretim işlemler yönetimi alan yazını incelendiğinde sürdürülebilir üretim ve dijitalleşme konularının oldukça yaygın olarak çalışılmaktadır. Bu iki konunun birlikte ele alındığı çalışmalar ise günden güne artmakla birlikte işletmelerde uygulamaya yönelik sistematik bir yapının eksikliği gözlemlenmektedir. Bu çalışmada literatür taraması “sürdürülebilir üretim”, “dijitalleşme” ve “sürdürülebilir üretim ve dijitalleşme” başlıkları altında gerçekleştirilmiştir. Literatür taramasına ek olarak 2015-2025 yılları arasında gerçekleştirilen çalışmaların incelendiği bir bibliyometrik analiz gerçekleştirilerek temel temalar ortaya konmuştur.

Çalışma sonucuna göre temel eğilimlerin dijital ekonomi ve sürdürülebilirlik, dijital dönüşüm ve iş modelleri, döngüsel ekonomi, akıllı teknolojiler, ve çevresel ve sosyal faktörler üzerine olduğu, öte yandan ortaya konulan kümeler aracılığıyla dijital dönüşümün sürdürülebilirlik üzerindeki çok boyutlu etkilerini daha derinlemesine incelenerek özellikle, sektör bazında dijital teknolojilerin çevresel, ekonomik ve sosyal performansa etkilerini değerlendirecek çalışmalarda bu sonuçlar kaynak olarak kullanılabileceği ortaya konmuştur. Çalışmanın yönetsel çerçevesi, literatür taraması ve bibliyometrik analizle sınırlı kalmış olsa da, bu analizlerin derinleştirilmesi için önemli açılımlar mümkündür. Özellikle coğrafi, sektörel veya politik ayrımlara dayalı alt sınıflamalar yapılarak literatürün bölgesel farklılıkları daha açık biçimde ortaya konabilir. Bu bağlamda gelecek çalışmalarda farklı coğrafi bölgelerde ve sektörlerde bu kümelerin dinamikleri karşılaştırmalı olarak ele alınabilir, dijitalleşmenin sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumunu artırmaya yönelik stratejiler geliştirilmesi üzerinde durulabilir. Benzer şekilde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde dijital dönüşümün sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumu da farklılık göstermektedir. Bu tür sınıflandırmaların yapılması, gelecekteki ampirik çalışmalara da metodolojik bir zemin sağlayacaktır. Gelecek çalışmalarla ilgili son olarak bibliyometrik analizin, yapay zekâ destekli doğal dil işleme (NLP) teknikleriyle zenginleştirilerek tüm metin bazlı içerik analizlerine dönüştürülmesi önerilebilir. Bu yaklaşım, literatürdeki kavramsal yakınlıkları daha derinlemesine inceleme ve yeni kavramsal kümeler keşfetme imkânı sunacaktır. Sonuç olarak bu çalışmanın hem akademik literatüre hem de uygulamaya yönelik politika ve iş stratejilerine teorik bir altyapı sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Abbass, N. M., Rahman, A. A., Aziz, Y. A. ve Sidek, S. (2019). A Systematic Literature Review on Sustainable Production Indicators to Assess the Sustainable Performance of Industries. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 9(2). doi:10.6007/ijarbss/v9-i2/5583
- Agarwal, V., Hameed, A. Z., Malhotra, S., Mathiyazhagan, K., Alathur, S., & Appolloni, A. (2023). Role of Industry 4.0 in agile manufacturing to achieve sustainable development. *Business Strategy and the Environment*, 32(6), 3671-3688. doi.org:10.1002/bse.3321
- Asadollahi-Yazdi, E., Couzon, P., Nguyen, N. Q., Ouazene, Y. ve Yalaoui, F. (2020). Industry 4.0: Revolution or Evolution? *American Journal of Operations Research*, 10(06), 241–268. doi:10.4236/AJOR.2020.106014
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G. ve Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, 1–15. doi:10.1016/j.ijpe.2020.107776
- Beier, G., Niehoff, S., Ziems, T. ve Xue, B. (2017). Sustainability Aspects of a Digitalized Industry – A Comparative Study from China and Germany. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 4(2), 227–234. doi:10.1007/s40684-017-0028-8
- Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M. ve Habich, M. (2020). Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes – A literature review. *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120856
- Birkel, H. S. H. S. H. S., Veile, J. W. J. W., Müller, J. M. J. M., Hartmann, E. ve Voigt, K.-I. K. I. (2019). Development of a risk framework for Industry 4.0 in the context of sustainability for established manufacturers. *Sustainability (Switzerland)*, 11(2), 1–27. doi:10.3390/su11020384
- Braccini, A. M. ve Margherita, E. G. (2019). Exploring Organizational Sustainability of Industry 4 . 0 under the Triple Bottom Line: The Case of a Manufacturing Company. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1), 1–17. doi:10.3390/su11010036
- Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M. ve Saccani, N. (2018). Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3). doi:10.3390/su10030639
- Brozzi, R., Forti, D., Rauch, E. ve Matt, D. T. (2020). The advantages of industry 4.0 applications for sustainability: Results from a sample of manufacturing companies. *Sustainability (Switzerland)*, 12(9). doi:10.3390/su12093647
- Cuevas-Pichardo, L. J., Maldonado-Guzmán, G., Gómez-Guillamón, A. D., & Garza-Reyes, J. A. (2025). The mediating role of circular economy in the relationship between industry 4.0 and sustainable performance in the manufacturing industry. *Business Strategy and the Environment*, 34(2), 1735-1750. Doi: 10.1002/bse.4075
- de Sousa Jabbour, A. B. L., Jabbour, C. J. C., Foropon, 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 and Social Change*, 132(February), 18–25. doi:10.1016/j.techfore.2018.01.017
- Dubey, R., Gunasekaran, A., Childe, S. J., Papadopoulos, T., Luo, Z., Wamba, S. F. ve Roubaud, D. (2017, 1 Temmuz). Can big data and predictive analytics improve social and environmental sustainability? *Technological Forecasting and Social Change*, ss. 534–545. Elsevier Inc. doi:10.1016/j.techfore.2017.06.020
- Dubey, R., Gunasekaran, A., Childe, S. J., Wamba, S. F. ve Papadopoulos, T. (2016). The impact of big data on world-class sustainable manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(1–4), 631–645. doi:10.1007/s00170-015-7674-1
- Furstenau, L. B., Sott, M. K., Kipper, L. M., MacHado, E. L., Lopez-Robles, J. R., Dohan, M. S. Imran, M. A. (2020). Link between Sustainability and Industry 4.0: Trends, Challenges and New Perspectives. *IEEE Access*. doi:10.1109/ACCESS.2020.3012812
- Gabriel, M., Pessl, E., Magdalena, G., Gabriel, M., Pessl, E. ve Magdalena, G. (2016). Industry 4.0 and Sustainability Impacts: Critical Discussion of Sustainability Aspects with a Special Focus on

- García-Muñia, F. E., González-Sánchez, R., Ferrari, A. M. ve Settembre-Blundo, D. (2018). The Paradigms of Industry 4.0 and Circular Economy as Enabling Drivers for the Competitiveness of Businesses and Territories: The Case of an Italian Ceramic Tiles Manufacturing Company. *Social Sciences*, 7(12), 255. doi:10.3390/socsci7120255
- Garrido-Hidalgo, C., Hortelano, D., Roda-Sanchez, L., Olivares, T., Ruiz, M. C. ve Lopez, V. (2018). IoT Heterogeneous Mesh Network Deployment for Human-in-the-Loop Challenges Towards a Social and Sustainable Industry 4.0. *IEEE Access*, 6, 28417–28437. doi:10.1109/ACCESS.2018.2836677
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119869
- Ghobakhloo, M., Fathi, M., Iranmanesh, M., Maroufkhani, P. ve Morales, M. E. (2021). Industry 4.0 ten years on: A bibliometric and systematic review of concepts, sustainability value drivers, and success determinants. *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2021.127052
- Gružauskas, V., Baskutis, S. ve Navickas, V. (2018). Minimizing the trade-off between sustainability and cost effective performance by using autonomous vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 184, 709–717. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.302
- Habib, M. K. ve Chimsom, C. (2019). Industry 4.0: Sustainability and design principles. Proceedings of the 2019 20th International Conference on Research and Education in Mechatronics, REM 2019 içinde . doi:10.1109/REM.2019.8744120
- Lin, K. C., Shyu, J. Z. ve Ding, K. (2017). A cross-strait comparison of innovation policy under industry 4.0 and sustainability development transition. *Sustainability (Switzerland)*, 9(5). doi:10.3390/su9050786
- Lopes de Sousa Jabbour, A. B., Jabbour, C. J. C., Godinho Filho, M., Roubaud, D., Lopes de Sousa Jabbour, A. B., Jabbour, C. J. C., Roubaud, D. (2018). Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. *Annals of Operations Research*, 270(1–2), 273–286. doi:10.1007/s10479-018-2772-8
- 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. doi:10.1016/j.psep.2018.04.018
- M.W. Waibel, G.A. Oosthuizen, du Toit, D. W., Waibel, M. W. W., Oosthuizen, G. A. A., Du Toit, D. W. W., M.W. Waibel, G.A. Oosthuizen, du Toit, D. W., Waibel, M. W. W., ... Du Toit, D. W. W. (2018). Investigating current smart production innovations in the machine building industry on sustainability aspects building. *Procedia Manufacturing*, 21(2017), 774–781. doi:10.1016/j.promfg.2018.02.183
- Mckenzie, S. (2004). *Social Sustainability: Towards Some Definitions*. <http://www.apo.org.au/node/565> adresinden erişildi.
- Moldavska, A. ve Welo, T. (2019). A Holistic approach to corporate sustainability assessment: Incorporating sustainable development goals into sustainable manufacturing performance evaluation. *Journal of Manufacturing Systems*, 50, 53–68. doi:10.1016/J.JMSY.2018.11.004
- Müller, Julian M. ve Voigt, K. I. (2018). Sustainable Industrial Value Creation in SMEs : A Comparison between Industry 4 . 0 and Made in China 2025. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology*, 5(5), 659–670. doi:10.1007/s40684-018-0056-z
- Müller, Julian Marius, Kiel, D. ve Voigt, K. I. (2018). What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 10(1). doi:10.3390/su10010247
- Niehoff, S. ve Beier, G. Industrie 4.0 and a sustainable development: a short study on the perception and expectations of experts in Germany (2018). *Inderscience Publishers*. doi:10.1504/ijisd.2018.091543
- Núbia Carvalho, Omar Chaim , Edson Cazarinia, M. G., Carvalho, N., Chaim, O., Cazarini, E. ve Gerolamo, M. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution : A positive prospect in

- Sustainable Manufacturing. 15th Global Conference on Sustainable Manufacturing içinde (C. 21, ss. 671–678). Elsevier. doi:10.1016/j.promfg.2018.02.170
- Prause, G. (2017). Sustainable business models and structures for industry 4.0. *Journal of Security and Sustainability Issues*, 5(2), 159–169. doi:10.9770/jssi.2015.5.2
- Qureshi, K. M., Mewada, B. G., Kaur, S., Alghamdi, S. Y., Almakayeel, N., Almuflih, A. S., & Qureshi, M. R. N. M. (2023). Sustainable manufacturing supply chain performance enhancement through technology utilization and process innovation in industry 4.0: a SEM-PLS approach. *Sustainability*, 15(21), 15388.
- Sharma, M., Kamble, S., Mani, V., Sehrawat, R., Belhadi, A. ve Sharma, V. (2021). Industry 4.0 adoption for sustainability in multi-tier manufacturing supply chain in emerging economies. *Journal of Cleaner Production*, 281. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125013
- Sharma, R., Jabbour, C. J. C. ve Lopes de Sousa Jabbour, A. B. (2020). Sustainable manufacturing and industry 4.0: what we know and what we don't. *Journal of Enterprise Information Management*. doi:10.1108/JEIM-01-2020-0024
- Song, Z. ve Moon, Y. (2017). Assessing sustainability benefits of cybermanufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(5–8), 1365–1382. doi:10.1007/s00170-016-9428-0
- Stiel, F. ve Teuteberg, F. (2015). Industry 4.0 Business Models in a Sustainable Society : Challenges , Competencies and Opportunities *Proceedings zur Wissenschaftstagung*. (ss. 0–3).
- Stock, T. ve Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP* içinde (C. 40, ss. 536–541). Elsevier. doi:10.1016/j.procir.2016.01.129
- Stock, Tim, Obenaus, M., Kunz, S. ve 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
- Tavares-Lehmann, A. T. ve Varum, C. (2021). Industry 4.0 and sustainability: A bibliometric literature review. *Sustainability* (Switzerland), 13(6). doi:10.3390/su13063493
- Tıraş, H. (2012). Sürdürülebilir Kalkınma ve Çevre: Teorik Bir İnceleme. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 2(2), 57–73.
- Tomaschko, F., Reichelt, L., & Krommes, S. (2024). Digitalisation of Manufacturing Systems: A Literature Review of Approaches to Assess the Sustainability of Digitalisation Technologies in Production Systems. *Sustainability*, 16(15), 6275. Doi: 10.3390/su16156275
- Tseng, M.-L. L., Tan, R. R., Chiu, A. S. F., Chien, C.-F. F. ve Kuo, T. C. (2018). Circular economy meets industry 4.0: Can big data drive industrial symbiosis? *Resources, Conservation and Recycling*, 131(December 2017), 146–147. doi:10.1016/j.resconrec.2017.12.028
- Turkcan, H. (2025). How to improve financial performance through sustainable manufacturing practices? The roles of green product innovation and digital transformation. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 36(3), 577-596. Doi: 10.1108/JMTM-03-2024-0112
- Verma, P., Kumar, V., Daim, T., Sharma, N. K., & Mittal, A. (2022). Identifying and prioritizing impediments of industry 4.0 to sustainable digital manufacturing: A mixed method approach. *Journal of Cleaner Production*, 356, 131639. Doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131639
- Winroth, M., Almström, P. ve Andersson, C. (2016, 4 Temmuz). Sustainable production indicators at factory level. *Journal of Manufacturing Technology Management*. Emerald Group Publishing Ltd. doi:10.1108/JMTM-04-2016-0054
- Yadav, G., Kumar, A., Luthra, S., Garza-Reyes, J. A., Kumar, V. ve Batista, L. (2020). A framework to achieve sustainability in manufacturing organisations of developing economies using industry 4.0 technologies' enablers. *Computers in Industry*, 122. doi:10.1016/j.compind.2020.103280