



Döngüsel Ekonomi ve Endüstri 4.0: Bir Literatür Araştırması

Circular Economy and Industry 4.0: A Literature Survey

ÖZET

Döngüsel Ekonomi ve Endüstri 4.0 ile ilgili inceleme ve araştırmalar son yıllarda önem kazanmakla birlikte, Nesnelerin İnterneti (IoT) olgusunun büyümesiyle paralel bir şekilde, döngüsel ekonominin gelişmesinde çeşitli paydaşlar için fırsatlar ve potansiyel riskler ortaya çıkmaktadır. Değer zincirlerinin, ürünlerin, iş modellerinin dijital dönüşüme uğrayıp ve birbirine bağlanmasıyla ilişkili olan Endüstri 4.0 paydaşlarının, Nesnelerin İnterneti kavramının döngüsel ekonomi yönetiminde nasıl bir rol oynayacağı konusuna dair beklentileri gözler önüne sermek bu çalışmanın amacını teşkil etmektedir. Bu çalışma, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi arasındaki ilişkiyi, özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) bağlamında ele alan literatürü sistematik bir yaklaşımla incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında Web of Science, Scopus, TR Dizin ve Ulusal Tez Merkezi veri tabanlarında yer alan çalışmalar taranmış; belirlenen dahil etme ve hariç tutma kriterleri doğrultusunda seçilen yayınlar analiz edilmiştir. Bulgular, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi uygulamalarını; ürün yaşam döngüsü yönetimi, izlenebilirlik, kaynak verimliliği ve tersine lojistik gibi mekanizmalar aracılığıyla desteklediğini göstermektedir. Bununla birlikte, literatürün büyük ölçüde kavramsal ve betimleyici çalışmalardan oluştuğu, ampirik araştırmaların ve paydaş beklentilerini merkeze alan analizlerin sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Çalışma, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi entegrasyonunun yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda örgütsel ve yönetsel bir dönüşüm süreci olarak ele alınması gerektiğini vurgulayarak, gelecekte yapılacak araştırmalar için bütüncül bir çerçeve sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, Nesnelerin İnterneti, Dijital Dönüşüm, Döngüsel Ekonomi.

ABSTRACT

Although research on the Circular Economy and Industry 4.0 has gained increasing attention in recent years, the rapid expansion of the Internet of Things (IoT) has simultaneously created both opportunities and potential risks for various stakeholders in the development of circular economy practices. In this context, the primary objective of this study is to reveal the expectations of Industry 4.0 stakeholders regarding the role of the Internet of Things in circular economy management, particularly in relation to the digital transformation and interconnection of value chains, products, and business models. Accordingly, this study aims to systematically review the literature examining the relationship between Industry 4.0 and the circular economy, with a specific focus on the Internet of Things. Publications indexed in Web of Science, Scopus, TR Dizin, and the Ulusal Tez Merkezi were systematically screened and analyzed based on predefined inclusion and exclusion criteria. The findings indicate that Industry 4.0 technologies support circular economy applications through mechanisms such as product life cycle management, traceability, resource efficiency, and reverse logistics. Nevertheless, the existing literature is largely dominated by conceptual and descriptive studies, while empirical research and analyses explicitly focusing on stakeholder expectations remain limited. By emphasizing that the integration of Industry 4.0 and the circular economy should be addressed not only as a technological transformation but also as an organizational and managerial process, this study offers a comprehensive framework to guide future research.

Keywords: Industry 4.0, Internet of Things, Digital Transformation, Circular Economy.

GİRİŞ

Dördüncü Sanayi Devrimi (Endüstri 4.0), geleneksel üretim ve endüstriyel faaliyetlerin modern, akıllı teknolojilerden faydalanılarak otomatik hale getirilmesi şeklinde ifade edilmektedir. Makineden makineye etkileşim ve nesnelerin interneti (IoT) entegrasyonu sayesinde otomasyon artmakta, sistemler arası etkileşim güçlenmekte ve makineler kendi durumlarını izleyip olası sorunlarını analiz ederek teşhis edebilecek bir yapıya kavuşmaktadır. Endüstri 4.0'ın döngüsel ekonomi ile bir araya gelmesi ise doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlayan ve sürdürülebilir üretim yaklaşımlarını destekleyen iki önemli endüstriyel paradigmanın birleşimini ifade etmektedir (Rosa vd., 2020: 1663). Bununla birlikte, döngüsel ekonomi, atığı doğası gereği değerli olarak yeniden kavramsallaştıran daha akıllı sistemlerin geliştirilmesi, iletişim ve yenilikçi yaşam döngüsü yönetimini desteklemek için daha fazla dikkat çekmektedir (Perey vd., 2018: 632). Bu sanayi devrimi, herkesi her şey ile entegre eden kablolu bağlantı ve sensörler gibi dijital teknolojilere dayanmaktadır. Böylelikle veriler toplanabilmekte, tüm üretim sistemi analiz edilip görselleştirilebilmekte ve iş sistemine uygulanabilir bilgiler sağlayabilmektedir (Wang vd., 2016: 158-159). RüBmann vd., (2015) Endüstri 4.0'ı; eklemeli üretim, simülasyon teknolojileri, otonom robotlar ve araçlar, artırılmış sanal gerçeklik uygulamaları, nesnelerin interneti, bulut bilişim ve siber güvenlik gibi çeşitli teknolojilerin bir araya gelmesi sonucunda oluşan bir sistem olarak tanımlanmaktadır.

Burcu Öztaş¹

How to Cite This Article

Öztaş, B. (2026). Döngüsel ekonomi ve endüstri 4.0: Bir literatür araştırması. *Journal of Social, Humanities and Administrative Sciences*, 12(1), 49-61. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18429019>

Arrival: 08 October 2025

Published: 29 January 2026

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

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

¹ Dr., Kahramanmaraş, Türkiye.

Endüstri 4.0 üzerine yapılan çalışmalar, çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltma potansiyeli yüksek olan geniş bir alan yelpazesinde ortaya çıktığını ifade etmektedirler. Bazı araştırmacılar Endüstri 4.0'ı öncelikle çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bir araç olarak değerlendirirken, bazı araştırmacılar ise bunu riskleri azaltma ve verimliliği artırma açısından önemli bir fırsat olarak görmektedir (Stock ve Seliger, 2016: 536). Bu çalışmada, söz konusu yaklaşımların nesnelerin internetinin (IoT) destekleyici taraflarını yansıttığı öne sürülmektedir. Endüstri 4.0, döngüsel ekonomi ile ilgili sorunların çözümüne katkı sağlayabilecek çeşitli olanaklar sunmaktadır. IoT pek çok endüstride kaynaklarının yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve onarımı etmek için kullanılmakta olup, döngüsel ekonominin daha hızlı bir biçimde gelişmesine olanak tanımaktadır. Döngüsel ekonomi, uzun vadeli sürdürülebilir kalkınma hedeflerine yaklaşmak için üretim faktörlerinin kullanımının azaltılması, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve kullanım ömrünü tamamlamış ürünlerden malzeme çıkarma üzerine kurulu bir ekonomik sistem olarak ifade edilebilmektedir. Böylelikle, döngüsel bir ekonomiyi sürdürmek, tasarım yoluyla iyileştirici ve yenileyici bir sistem oluşturulduğunda gerçekleşmektedir (Kirchherr vd., 2017: 222).

Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi son yıllarda hızlı bir şekilde büyümeye devam ederek günümüz dijital çağının temel temalarından birini temsil eder hale gelmiştir. Bu alandaki çalışmaların birçoğu, Endüstri 4.0 ile verimlilik arasındaki bağlantıyı ve döngüsel ekonomiyi uygulamadaki zorlukları incelemeye odaklanmıştır (Rajput ve Singh, 2019: 98). Döngüsel ekonomi üzerine yapılan önceki çalışmalar, özellikle Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanmasını araştırmaya odaklanmıştır. Son dönemlerde döngüsel ekonomi arayüzü ile dijital teknolojiler, önemli bir odak noktası haline gelmiştir (Okorie vd., 2018: 2). Özellikle imalat sanayinde, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi konularında yapılan çalışmalar, nesnelerin internetinin (IoT) döngüsel ekonomideki potansiyelini ve katkı kapasitesini anlamamıza yardımcı olan geniş bir literatür oluşturmaktadır (Nobre ve Tavares, 2017: 465).

IoT ve döngüsel ekonomi girişimlerinin uygulanmasını geliştirmek için tüketici ve tedarikçiler başta olmak üzere paydaşların beklentilerinin anlaşılmasına yönelik önemli bir ihtiyaç bulunmaktadır (Wen vd., 2018: 27). Ancak döngüsel ekonomi ve nesnelerin interneti (IoT) bağlamında, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi uygulamalarını hangi mekanizmalar aracılığıyla desteklediği sorusu literatürde yeterince yanıtlanmamıştır. Mevcut çalışmaların büyük bir kısmı, döngüsel ekonomi ile Endüstri 4.0 arasındaki ilişkiyi ve etkileşimi incelemeye odaklanmıştır; buna karşın IoT'nin döngüsel ekonomi üzerindeki etkilerinin literatürde hangi temalar etrafında yoğunlaştığı açık biçimde ortaya konulamamıştır (Rosa vd., 2020: 1663). Alcayaga vd. (2019), yeniden üretim ve geri dönüşüm hizmetlerinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için paydaşlar, örgütsel yapı ve kurumsal kültür gibi iç ve dış unsurların daha iyi anlaşılması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, mevcut çalışmaların metodolojik ve kavramsal boşluklarının neler olduğu ve bu boşlukların döngüsel ekonomi araştırmalarını nasıl sınırladığı önemli bir tartışma alanı olarak ortaya çıkmaktadır. Önceki araştırmalarda IoT'nin üretim süreçleri ve ürün yaşam döngüsü yönetimi üzerindeki etkileri incelenmiş olsa da Endüstri 4.0 bağlamında paydaş beklentilerinin döngüsel ekonomi geçişini nasıl etkilediği sorusu netlik kazanmamıştır. Bu çalışmada söz konusu sorulara yanıt aramak amacıyla, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi literatürü sistematik bir yaklaşımla ele alınmış; literatür, döngüsel ekonomi ve IoT olmak üzere iki ana eksenle incelenmiştir. Bu doğrultuda, Endüstri 4.0 çerçevesinde döngüsel ekonomi araştırma alanlarının yapılandırılması, ortaya çıkan temel araştırma temalarının belirlenmesi ve literatürdeki önemli boşlukların tespit edilmesi amaçlanmıştır.

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Sarc vd., (2019) Endüstri 4.0 ile ilgili bir literatür çalışması, döngüsel ekonomi ve atık yönetimi konularını ele almıştır. Kerin ve Pham (2019), literatüre üretimde Endüstri 4.0 teknolojilerinin kapsamlı bir analizini dahil ederek, yeniden üretim sürecinde IoT üzerinde odaklanmış ve gelecekte yapılacak olan çalışmaların, yeniden üretimde IoT'nin daha geniş bir ölçekle benimsenmesine odaklanması gerektiğine vurgu yapmıştır. Kerin ve Pham elde ettikleri bulguları özetleyerek, taraflar arasında daha fazla iş birliği, karar vermede yapay zekanın kullanımı ve yeni hizmet veya ürün geliştirme yolları olarak ürün-hizmet sisteminin genişletilmesi gibi Endüstri 4.0'ın yaratacağı faydaları tartışmışlardır. Jabbour vd., (2019), operasyon yönetimi kapsamında döngüsel bir iş modeli olan CBM'nin gelişimini incelemiş ve bu süreçte özellikle örgütler arası teknolojilere odaklanmışlardır. Zheng vd., (2019), akıllı ürün-hizmet sistemi ve gelecekteki perspektif ile ilgili bir çalışma yapmış ve insan merkezli bir yaşam döngüsü yönetimi yaklaşımına ihtiyaç duyulduğunu ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, döngüsel ekonomi ile Endüstri 4.0 arasındaki bağlantıyı izleyen çalışmada Cezarino vd., (2019), farklı aktörler arasında iş modellerinin dijitalleştirilmesinin nasıl destekleneceği hakkında net bir iletişim kurulursa, Endüstri 4.0 araçlarının döngüsel ekonomi için faydalı olabileceği vurgulanmıştır. Bressanelli vd., (2018), yeni dijital teknolojilerin uygulanması yoluyla döngüsel ekonomiyi destekleyen yenilikçi iş modellerine odaklanmıştır. Okorie vd., (2018) ise dijitalleşme ile döngüsel ekonomi arasındaki ilişki üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Mevcut bilişim teknolojilerinin alt yapı düzeyine bağlı olarak nesnelerin internetinin üretimde kritik bir araç rolü üstelenebileceği beklentisi nedeniyle döngüsel ekonomi ve Endüstri 4.0 arasındaki bağlantının araştırılması gerektiğini savunmuşlardır. Franciosi vd.,

(2017), Endüstri 4.0'ın yeniden üretilmiş ve kullanılmış yedek parçaları güncelleyerek kullanımının arttırabileceği durumda, IoT'ye olan artan bağımlılığın sağladığı faydaları tartışmışlardır.

Nesnelerin interneti (IoT) araçları sayesinde karar vericiler, ürünlerin bakım süreçlerine ilişkin verileri analiz edebilmekte ya da ürün bileşenlerinde yapılacak değişikliklerle ürünün ömrünü uzatabilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar arasında, Endüstri 4.0 araçlarına odaklanan çalışmaların sayısının oldukça yetersiz olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, IoT uygulamalarının ürünlerin ve malzemelerin döngüsel ekonomisini geliştirmedeki rolü hakkında Endüstri 4.0 paydaşlarının ilgi ve beklentilerinin ne olduğu konusundaki araştırma fırsatlarının göz ardı edildiği görülmüştür (Awan vd., 2020: 2040). Döngüsel ekonomi ve IoT hakkında benzeri görülmemiş bir hızla ilerleme kaydedildiğinden bu araştırmaya duyulan ihtiyaç oldukça büyüktür. En güncel çalışmaların, özellikle IoT ve döngüsel ekonomi alanındaki özetini sunmak en iyi uygulamaları ortaya çıkarmak ve gelecekteki araştırmalara rehberlik etmek önem arz etmektedir.

Nesnelerin interneti kavramı ilk olarak 90'ların sonunda iş insanı Kevin Ashton tarafından ortaya atılmıştır. Ashton, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) bünyesindeki Auto-Id programının öncülerinden olan, RFID etiketleri kullanarak maddi cihazların internete nasıl bağlanacağını belirleyen bir gruba katılmıştır. 2011 yılında Almanya, endüstri verimliliğini, üretkenliği, güvenliği ve şeffaflığı artırmak amacıyla Endüstri 4.0 terimini ilk ortaya koyan ülke olmuştur. Endüstri 4.0 terimi halen başlangıç aşamasında olan bir kavram olarak görülmektedir. Bu kavram, iş birimlerinde ve küresel değer zinciri genelinde bilgi alışverişi ve iş birliğini temsil eden siber fiziksel üretim sistemlerinin temel ilkelerinden birini oluşturmaktadır (Szalavetz, 2019: 386). Endüstri 4.0 kavramı, akıllı fabrika veya akıllı üretim olarak ifade edilen akıllı üretim anlayışına dayanmaktadır (Kang vd., 2016: 114). Endüstri 4.0'ın temel unsurlarından biri ise üretim süreçlerinde dijital otomasyonun ve veri alışverişinin sağlanmasıdır. Bu duruma ise “endüstriyel nesnelerin interneti” (IIoT), AI (yapay zekâ), bulut bilişim, akıllı üretim ve akıllı fabrikayı kapsamaktadır (Brettel vd., 2014: 39).

Endüstri 4.0 her ne kadar başlangıçta üretim alanında geliştirilmiş olsa da zamanla üretim ve hizmet sektörlerinde otomasyonun ötesine geçerek farklı alanlarla da ilişkilendirilmiştir. Bu çerçevede, nesnelerin interneti (IoT), endüstrilere geri dönüştürülmüş veya yeniden kullanılabilir ürünlerin geliştirilmesi ve pazarlanabilirliğinin artırılması konusunda çeşitli fırsatlar sunmaktadır. Ayrıca IoT, kullanım ömrünü tamamlamış ürünlerden parça ve bileşenlerin geri kazanımına olanak sağlayarak ürün geliştirme süreçlerine önemli katkılar tanımaktadır. Bunların yanı sıra, pazarlama ve tedarik zinciri gibi farklı alanlarda da IoT uygulamaları bulunmakta olup, bu teknolojiler akıllı şehirlerin genişletilmesine kadar geniş bir yelpazede kullanılabilir (Scuotto vd., 2016: 360). Bienhaus ve Haddud (2018), Endüstri 4.0'ın tedarik üzerindeki etkisini; Dolgui vd., (2019), üretimin programlanması, makineler ve malzemeler üzerinde gerçek zamanlı görünürlüğü; Majeed ve Rupasinghe (2017), ürün kalitesindeki iyileşmeleri Endüstri 4.0 ve IoT uygulamalarının benimsenmesini incelemiştir. Literatür taraması, belirli bir konunun incelenmesinde yaygın bir şekilde kabul gören yöntem olup, araştırma için uygun bir çerçeve sunmaktadır. Sistematik literatür taraması ise belirli bir bilimsel alandaki mevcut çalışmaların daha nesnel, yapılandırılmış ve kapsamlı bir biçimde değerlendirilmesini sağlayan yaklaşımdır (Munn vd., 2018).

Bu literatür araştırmasında gözden geçirilmek üzere birçok makale seçilmiş ve sistematik bir inceleme yapılmıştır. Bu incelemenin amacı, mevcut çalışmaları bir araya getirerek sentezlemek ve ardından belirli bir bilimsel araştırma alanındaki gelişmeleri kısa ve sistematik bir biçimde ortaya koymaktır. Çalışmada anahtar kelime aramaları için Ulusal Tez Merkezi, TR Dizin, Scopus ve Web of Science verilerini içeren bilimsel yayınlar kullanılmıştır. Bu amaçla, özellikle 2006 yılı ve sonrası dönem için Döngüsel Ekonomi, Endüstri 4.0 ve Nesnelerin İnterneti konularında yayınlanan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan Web ve konu ile ilgili anahtar kelime aramaları sonucunda konu ile ilişkili yaklaşık olarak 380 yayınlanmış çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmaların bir kısmı tarama esnasında konu bakımından uyumlu bulunmadığından, teknik IoT çalışmalarının dahil edilmesi istenmediğinden, döngüsellik içermeyen Endüstri 4.0 çalışmaları ve kavramsal bağı zayıf olan yayınlar yazar tarafından elenmiştir. Bununla birlikte literatür incelemesinde yer alan çalışmaların en fazla atıf alan çekirdek çalışmalar olması konusuna dikkat edilmiştir. Araştırma esnasında anahtar kelime olarak; “Döngüsel Ekonomi ve Endüstri 4.0” kavramlarından yararlanılmıştır.

Tablo 1. Döngüsel Ekonomi ve Endüstri 4.0 Literatür Araştırması

Yazarlar	Çalışmanın Başlığı	Metot	Bulgular
Tümay Ateş (2025)	“Endüstri 4.0 Bileşenlerinin Döngüsel Ekonomi Üzerindeki Rolü: Regresyon Analizine Dayalı Ampirik Bir Çalışma”	Ampirik Çalışma	Dijital üretim sürecinin, geri dönüşümü en fazla arttıran faktör olduğunu ifade etmişlerdir.
Gatell ve Avella (2024)	“Impact of Industry 4.0 and Circular Economy on Lean Culture and Leadership: Assessing Digital Green Lean as a New Concept”	Literatür Araştırması	Endüstri 4.0 ve Döngüsel Ekonominin, sürdürülebilirlik ve dijital dönüşümü dahil etmek adına Yalın Liderlik ve Kültür tarzlarında değişikliğe ihtiyaç duyduğu görülmüştür.

Köksal (2024)	“Endüstri 4.0 Teknolojileri ve Döngüsel Ekonominin Sürdürülebilir İşletme Performansına Etkisi: Asansör Sektöründe Uygulama”	Ampirik Çalışma	Endüstri 4.0 ile döngüsel ekonomi arasında ve döngüsel ekonomi ile sürdürülebilir performans arasındaki ilişkinin artırıcı yönde olduğunu ve Endüstri 4.0’ın döngüsel ekonomi vasıtasıyla sürdürülebilir performans üzerinde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
Türkyılmaz (2024)	“Endüstri 4.0 ve Endüstriyel Nesnelerin İnterneti: Uygulama, Fırsat ve Zorluklar-Literatür Taraması”	Literatür Araştırması	Yakın gelecekte Endüstriye Nesneleri İnternetinin (IIoT), makine öğrenimi, yapay zekâ, sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik gibi gelişen teknolojileri teşvik etmek amacıyla geliştirileceğini ifade etmiştir.
Ghaithan vd., (2023)	“Integrated Impact of Circular Economy, Industry 4.0, and Lean Manufacturing on Sustainability Performance of Manufacturing Firms”	Nitel Araştırma	Döngüsel ekonominin şirketlerin sürdürülebilirliği üzerinde olumlu etkisinin olduğunu vurgulamışlardır. Endüstri 4.0 ve yalın üretimin, şirketlerin sürdürülebilir performansına ilişkin döngüsel ekonominin başarılı bir şekilde uygulanmasını sağlayan olumlu aracılık etkilerine sahip olduğunu göstermişlerdir.
Karamustafa vd., (2022)	“Döngüsel Ekonomi ve Endüstri 4.0’ın Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini Gerçekleştirmeye Etkisi: Sistemik Literatür Taraması”	Sistemik Literatür Taraması	Döngüsel ekonomi ve Endüstri 4.0 ilişkisinin sürdürülebilir kalkınma üzerinde Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları 7-8-9-11-12-13 (SKA) hedeflerine doğrudan katkıda bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır.
Romero vd., (2021)	“Synergy between Circular Economy and Industry 4.0: A Literature Review”	Literatür Araştırması	Döngüsel ekonomiye geçişin topluma maliyetinin ne olacağına ve bu aktörlerin sosyal başarısızlıktan kaçınmak için hangi stratejilere sahip olduğu konusunun belirsizliğine dikkat çekmişlerdir.
Alcayaga vd., (2019)	“Towards a Framework of Sustainable Supply Chain for Industry 4.0 Requirements”	Literatür Araştırması	Nesnelerin İnternetinin iş modellerini bozabileceği ve döngüsel bir ekonomi geliştirme potansiyeline sahip olduğunu ileri sürmüşlerdir.
Charnley vd., (2019)	“Simulation to Enable a Data-Driven Circular Economy”	Modelleme	Dördüncü Sanayi Devrimi (II.4.0) ile Nesnelerin İnternetinin (IIoT) dijital zekayı geliştirme potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir.
Dau vd., (2019)	“The Healthcare Sustainable Supply Chain 4.0: The Circular Economy Transition Conceptual Framework with the Corporate Social Responsibility Mirror”	Ampirik Analiz	4. Sanayi Devrimi’nin, sürece döngüsellik kazandırarak sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlayacağını belirtmişlerdir.
Gomez vd., (2019)	“A Colonic Framework for Managing the Sustainable Supply Chain in Emerging Economies with Smart Connected Metabolism”	Matematiksel Modelleme	Endüstri 4.0’ın döngüsellik çözümlerinin geliştirilmesine yol açabileceği ve dağıtılmış karmaşık sistemlerin analiz edilmesine imkân tanıyacağını ifade etmişlerdir.
Gupta vd., (2019)	“Circular Economy and Big Data Analytics: A Stakeholder Perspective”	Nitel	Döngüsel ekonomi kapsamında tarafların büyük veri analizine yönelik bakış açılarının anlaşılması önem taşımaktadır.
Kusiak (2019)	“Fundamentals of Smart Manufacturing: A Multi-Thread Perspective”	Modelleme	Endüstri 4.0 araçlarının, yeni öğrenme süreçlerinin çevresel ve evrimsel aşamalarına ilişkin etiketleme materyallerinden anlamlı bilgilerin elde edilmesine olanak sağladığını öne sürmüştür.
Manavalan ve Jayakrishna (2019)	“A Review of IIoT Embedded Sustainable Supply Chain for Industry 4.0 Requirements”	Literatür Araştırması	Endüstri 4.0’ın gelişmesi ve iyileşmesi için teknolojiye yatırım yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.
Nord vd., (2019)	“The Internet of Things: Review and Theoretical Framework”	Literatür Araştırması	IIoT uygulama ekiplerine rehberlik etmek için IIoT öncelik alanlarıyla ilgili daha fazla araştırma yapılmasının gerekliliği vurgulanmıştır.
Raiput ve Singh (2019)	“Industry 4.0-Challenges to Implement a Circular Economy”	Literatür Araştırması	Siber-fiziksel sistemlerin standartlarını tanımlamışlar ve sensör teknolojisinin döngüsel bir ekonomiye ulaşmada Endüstri 4.0 en etkili engelleri olduğunu belirtmişlerdir.
Sarch vd., (2019)	“Digitalisation and Intelligent Robotics in the Value Chain of Circular Economy-Oriented Waste Management-A Review”	Literatür Araştırması	Endüstri 4.0’ın şeffaflık sağlayarak döngüsel ekonomiyi mümkün kıldığını iddia etmişlerdir.
Bonilla vd., (2018)	“Industry 4.0 and Sustainability Implications: A Scenario-Based Analysis of the Impacts and Challenges”	Nitel Analiz	Endüstri 4.0 uygulamalarının, toplumsal tepkiler, kamu politikaları ve yasal çerçevelere yakından bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir.
Wen vd., (2018)	“Design, Implementation and Evaluation of an Internet of Things (IIoT) a Network System	Literatür Araştırması	Nesnelerin İnterneti tabanlı sistem, konunun tarafları üzerinde net olumlu etkiler yarattığı sonucuna varmışlardır.

	for Restaurant Food Waste Management”		
Yang vd., (2018)	“Opportunities for Industry 4.0 to Support Remanufacturing”	Literatür Araştırması	Güvenilirliği ve verimliliği arttırmanın, Endüstri 4.0 araçlarının çeşitli kullanımlarıyla desteklenebileceğini belirtmişlerdir.
Zhong vd., (2017)	“Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review”	İnceleme	Akıllı üretimin kitlesel özelleştirme, daha iyi kalite ve artan verimlilikte ekonomik olarak önemli bir rol oynadığını öne sürmüşlerdir.
Su vd., (2013)	“Intelligent Manufacturing in the Context of Industr 4.0: A Review”	İnceleme	Teknolojinin döngüsel ekonomi gelişiminde önemli bir faktör olduğunu ileri sürmüşler ve döngüsel ekonomi prensiplerinden her birinin gelişmiş teknoloji ve gelişim ile tesis ve ekipmanların güncellenmesini gerektiğini ifade etmişlerdir.

DÖNGÜSEL EKONOMİ

Döngüsel ekonomi, MacArthur’a göre, “amaç ve tasarım açısından restoratif veya yenileyici olan bir endüstri ekonomisidir” (MacArthur, 2013: 14). Geissdoerfer vd., (2017) ise döngüsel ekonominin, kaynak girişi ve atık emisyonu ile enerji sızıntısının, malzeme ve enerji döngülerini yavaşlatıp, daraltarak en aza indirildiği yenileyici bir sistem olduğunu savunmuşlardır. Döngüsel ekonomi ve stratejik yönetim alanlarında çalışmalar yapan araştırmacılar, bir sistemde sorumlu üretim ve tüketimin atık yönetimi ve geri dönüşüm aracılığıyla nasıl ekonomik değer yarattığı konusuna odaklanmışlardır (Morales ve Sossa, 2020: 2481). Hofmann ve Erben (2020)’e göre döngüsel ekonomi, kullanımdan sonra ortaya çıkan atık ve süreçte ortaya çıkan atıklarını, yan ürünlerin geri dönüştürülmesi ve yeniden amaçlanması gibi süreçler aracılığıyla üretimle ilişkilendirilir. Bununla birlikte ürünlerin ve ürün bileşenlerinin içsel değerini korumaya çalışarak kullanımın her bir aşamasında; onarım, bakım, yükseltme, yeniden satış, yenileme ve yeniden üretim yolu ile kullanım aşamalarının ve kullanım sürelerinin sayısını en üst seviyeye çıkarmaktadır. Döngüsel ekonomi, atıkları değer zincirinin diğer bölümlerinde üretim faktörü olarak kullanmakta ve büyük oranda kapalı devre malzemelere odaklanmaktadır (Barreiro-Gen ve Lozano, 2020: 3487). Döngüsel ekonomi, Çetin (2020)’ye göre ise kullanım süresini dolduran her çeşit ürünün üretim amacının dışına çıkarılarak, yeni bir ürün üretilmesi için yeni bir girdi halini alması olarak ifade edilmiştir. Güleriyüz ve Duygulu (2020) doğrusal ekonominin sürdürülebilirliğe zıt olan yapısına karşın, döngüsel ekonomi bir ürünün sistemde yer alan kullanım ömrünün son bulması olayının ortadan kaldırılması şeklinde durumu özetlemişlerdir.

Gelişmekte olan ülkelerde döngüsel ekonomi bakımından Endüstri 4.0’ın daha ulaşılabilir ve uygulanabilir olduğu gözlemlenmiştir (Dau vd., 2019: 3260). Turner vd., (2019), döngüsel ekonomiye odaklanarak sürdürülebilir üretim ile ilgili literatürü analiz etmişlerdir. Kirchherr vd., (2017) döngüsel ekonomiyi, uzun vadeli sürdürülebilir kalkınma hedeflerine erişebilmek için malzemelerin yeniden kullanımı, azaltımı ve geri dönüşümü temeline dayalı bir ekonomik sistem olarak tanımlamıştır. Geri dönüşüm kavramı, bir süredir literatürde yer almakta olup, döngüsel ekonomi için kaynak döngüsü ile bağlantılı temel bir kavramdır (Murray vd., 2017: 373). Geri dönüşüm, kaynak döngüsü ile sınırlıdır ve operasyon ve üretim süreçlerinin daha iyi bakılması ile yeniden kullanılan malzeme, parçalar ve ürünlerin ömrünü uzatmaya odaklanmaktadır. Yeniden kullanım ise ürünün maksimum ömrü boyunca kullanımını ifade etmektedir.

DÖNGÜSEL EKONOMİ VE ENDÜSTRİ 4.0

Günümüzde pek çok firma operasyonel verimliliği arttırmak ve sürdürmek için IoT’yi uygulamaya başlamıştır. Nesnelerin internetinin uygulanması maliyetleri düşürebilmekte, israfı azaltmakta ve kaynakların tahsisini sağlamaktadır. IoT, kaliteyi arttırmak için yeniden üretim sürecinde uygulanabilmektedir. Üretim kalitesindeki iyileşme, israfın azalmasına, nakliye maliyetlerinin düşmesine, satışların artmasına ve müşteri memnuniyetinin yükselmesine neden olmaktadır. IoT, varlıkların bileşenlerine ayrılarak geri dönüştürülmesi için geri kazanıma yardımcı olabilmekte ve ürünlere IoT entegre edilerek, ürün koşulları ürün uzaktan izlenebilir ve ürünün onarımı için program geliştirilebilir. Ürüne entegre IoT cihazları, ürünün onarım, bakım ve ömrünü doldurduğu durumlarda geri bildirim sağlamaktadır. Bu akıllı ürün, şirketlerin yeni iş modelleri geliştirmesine ve hizmet sağlayıcılar ile üreticiler yaratmasına imkân tanımaktadır (Frank vd., 2019: 17). Wollschlaeger vd., (2017) tarafından ifade edildiği gibi, dijitalleşme ilerlemesi verimliliği arttırarak süreçten ve makineden kaynaklanan enerji israfını azaltmıştır. Endüstri 4.0’ın siber fiziksel sistemi ile paydaş iş birliklerinin entegrasyonu arasındaki etkileşim, döngüsel üretim için bir ön koşuldur.

Nascimento vd., (2018), Sanayi 4.0’ın malzeme verimliliğini, geri bildirim bilgilerini ve yeniden kullanım ve geri dönüşüm için toplama noktalarını kolaylaştırmayı desteklemek için kullanılabileceğine işaret etmişlerdir. Esposito (2017)’e göre, döngüsel ekonomi uygulamalarının hayata geçirilmesinde bazı engel ve zorluklara rağmen, nesnelerin interneti ile güçlendirilmiş bir ekonominin gelecekte uygulanmasının üretici firmalar için verimli olacağını ifade etmişlerdir. Endüstri 4.0 üretim sistemi kalitesini arttırmak ve hızlı yanıt verebilirliği sağlamak adına birçok teknolojiyi ortak fayda için toplamayı hedeflemektedir. Kısaca Endüstri 4.0’ın amacı, üretim verimliliğini geliştirmek

ve ilerletmektir. Üründeki bir hatanın otomatik olarak belirlenmesi, üretim sürecinde gelişmiş kendi kendine yönetilen otomasyonu teşvik etmektedir. Tao vd., (2018), IoT unsurlarını içeren yapay zekanın öngörü ile bakım sağlamayı mümkün kıldığını ifade etmişlerdir. Üretim verimliliği açısından bakıldığında, yapay zekanın kaliteyi artırmaya ve ürün geliştirme sürecinin erken aşamalarında uygunsuzlukları belirleme konusunda yardımcı olduğunu ileri sürmüşlerdir. Endüstri 4.0 faktörleri, bilgi alışverişini sağlar, atık oluşumunu azaltır ve hava kirliliğini kontrol etmek için üretim verimliliğini arttıracak geri bildirimlerde bulunur. Sanayinin tüm sektörlerinde IoT ile bütünleşmiş döngüsel ekonomi, yeniden kullanım, tamir ve yeniden üretim süreçlerini izleme ve otomatikleştirme konusunda ciddi bir fırsat sunmaktadır. IoT ile bütünleşmiş döngüsel ekonomi uygulamalarının temel faydası, bilinçli karar verebilme yeteneği olarak ifade edilmektedir (Awan vd., 2020: 2045).

Literatür taraması Ocak 2026 tarihinde Web of Science, Scopus, TR Dizin ve Ulusal Tez Merkezi veri tabanlarında “Endüstri 4.0” ve “Döngüsel Ekonomi” anahtar kelimeleri ile Türkçe ve İngilizce olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan veri tabanları, çeşitlilik ve içerik kalitesi bakımından güvenilir sonuçlar vermesi sebebiyle seçilmiştir. Çalışmada belirtilen veri tabanlarında belirtilen anahtar kelimeler ile tarama yapılmış; Web of Science’de 167 adet, Scopus’ta 269 adet, TR Dizin’de 9 adet ve Ulusal Tez Merkezi’nde ise her iki anahtar kelimenin yer aldığı çalışmaya rastlanamamış ancak “döngüsel ekonomi” kavramını içeren 139 adet ve “endüstri 4.0” kavramını içeren 491 adet çalışmaya rastlanmıştır. Tarama sonucunda elde edilen çalışmalar detaylı bir şekilde incelenerek Tablo 2’de verilen dahil etme ve hariç tutma kriterlerine göre çalışmaya dahil edilip edilmeyeceği konusunda karar verilmiştir.

Tablo 2. Dahil Etme ve Hariç Tutma Kriterleri

Veri Tabanı	Dahil Etme Kriterleri	Hariç Tutma Kriterleri	Gerekçe
Web of Science	“Döngüsel ekonomi” ve “Endüstri 4.0” anahtar kelimelerinin birlikte yer aldığı çalışmalar ve alan ile ilgili çalışmalar, ilgili veri tabanında taranan tam makaleler, kitap, kitap bölümleri ve bildiriler	Diğer veri tabanları ve mühendislik, bilişim teknolojileri ile biyolojik bilimler alanlarına odaklanan çalışmalar	Çalışma kapsamı dışına çıkmamak
Scopus	“Döngüsel ekonomi” ve “Endüstri 4.0” anahtar kelimelerinin birlikte yer aldığı çalışmalar ve alan ile ilgili çalışmalar, ilgili veri tabanında taranan tam makaleler, kitap, kitap bölümleri ve bildiriler	Diğer veri tabanları ve mühendislik, bilişim teknolojileri ile biyolojik bilimler alanlarına odaklanan çalışmalar	Çalışma kapsamı dışına çıkmamak
Ulusal Tez Merkezi	Anahtar kelimeler; “döngüsel ekonomi” ve “endüstri 4.0” ayrı ayrı aranarak elde edilen yüksek lisans ve doktora tez çalışmaları	Diğer veri tabanları ve tam makaleler, kitap, kitap bölümleri ve bildiri çalışmaları	Seçilen veri tabanının güvenilirliği, çalışmanın kapsamı dışına çıkmamak ve anahtar kelimelerin birlikte yer aldığı mevcut tez çalışmasının bulunmaması
TR Dizin	“Döngüsel ekonomi” ve “Endüstri 4.0” anahtar kelimelerinin birlikte yer aldığı çalışmalar ve alan ile ilgili çalışmalar, ilgili veri tabanında taranan tam makaleler, kitap, kitap bölümleri ve bildiriler	Diğer veri tabanları, ilgili veri tabanında taranmayan makaleler, tezler, bildiriler ve araştırma notları ve aynı yayının tekrarı	Seçilen veri tabanının güvenilirliği, çalışmanın kapsamı dışına çıkmamak

Bu çalışma kapsamında, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi arasındaki ilişkiyi doğrudan ele alan seçilmiş akademik yayınlar sistematik bir biçimde incelenmiştir. Tablo 3’de söz konusu tematik kesişimi ele alan çalışmalar; yayın yılı, yazar(lar), eser adı, tarandığı veri tabanı ve atıf sayıları ve yukarıda bahsedilen dahil etme ve hariç tutma kriterleri dikkate alınarak sunulmaktadır. Çalışmaların seçimi, Web of Science ve Scopus gibi uluslararası akademik geçerliliğe sahip veri tabanlarında yer alan ve başlık ve konu düzeyinde her iki kavramı da içeren yayınlarla sınırlandırılmıştır. Bu yaklaşım, literatürde konuya doğrudan odaklanan ve akademik etki düzeyi yüksek çalışmaların belirlenmesini amaçlamaktadır. Ayrıca karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılabilmesi amacıyla, ulusal literatürü temsil eden sınırlı sayıda TR Dizin kaynaklarına da tabloda yer verilmiştir.

Tablo 3. Araştırmaya Dahil Olan Çalışmalar

Yayın Yılı	Yazar	Eser Adı	Veri Tabanı	Atıf Sayısı
2025	Badea, Gorski, Ranf, Halmaghi ve Gorski	Interferences and Frontiers Between Industry 4.0 and Circular Economy	Web of Science	62
2023	Atif	Analysing The Alignment Between Circular Economy and Industry 4.0 Nexus with Industry 5.0 Era: An Integrative Systematic Literature Review	Web of Science	64
2023	Büyükkeklik ve Afşar	Döngüsel Ekonomi ve Verimlilik: Sosyal Bilimler Kapsamında Bir Literatür İncelemesi	TR Dizin	5
2023	Karakadılar	Türkiye’deki İhracatçı Sanayicilerin Endüstri 4.0 ve Döngüsel Ekonomi Uygulamalarına Yönelik Bir Ölçek Geliştirme Çalışması	TR Dizin	0
2023	Toth Peter, de Oliveira, Mathews, Barner ve Figueira	Industry 4.0 As an Enabler in Transitioning to Circular Business Models: A Systematic Literature Review	Web of Science, Scopus	65
2022	Agrawal, Wankhede, Kumar, Luthra ve Huisinsh	Progress and Trends in Integrating Industry 4.0 within Circular Economy: A Comprehensive Literature Review and Future Research Propositions	Web of Science	96
2022	Awan, Sroufe ve Bozan	Designing Value Chains for Industry 4.0 and A Circular Economy: A Review of the Literature	Web of Science	109
2022	Eisenreich, Fueller, Stuchtey ve Gimenez Jimenez	Toward a Circular Value Chain: Impact of the Circular Economy on a Company's Value Chain Processes	Web of Science, Scopus	76
2022	Gebhardt, Kopyto, Birkel ve Hartmann	Industry 4.0 Technologies as Enablers of Collaboration in Circular Supply Chains: A Systematic Literature Review	Web of Science	146
2022	Halloui, Herrou, Santos, Katina ve Egbue	Systems-Based Approach to Contemporary Business Management: An Enabler of Business Sustainability In a Context of Industry 4.0, Circular Economy, Competitiveness and Diverse Stakeholders	Web of Science, Scopus	58
2022	Sahu, Agrawal ve Kumar	Integrating Industry 4.0 and Circular Economy: A Review	Web of Science	48
2022	Voulgaridis, Lagkas, Angelopoulos, Nikolettseas	IoT and Digital Circular Economy: Principles, Applications, and Challenges	Web of Science, Scopus	48
2021	Ada, Kazancoglu, Sezer, Ede Senturk, Ozer ve Ram	Analyzing Barriers of Circular Food Supply Chains and Proposing Industry 4.0 Solutions	Web of Science	88
2021	Atif, Ahmed, Wasim, Zeb, Pervez ve Quinn	Towards A Conceptual Development of Industry 4.0, Servitisation, And Circular Economy: A Systematic Literature Review	Web of Science	57
2021	Birkel ve Müller	Potentials of industry 4.0 for supply chain management within the triple bottom line of sustainability e A systematic literature review	Web of Science, Scopus	238
2021	Cagro, Neri, Negri, Bassani ve Lampertico	The Role of Digital Technologies in Operationalizing the Circular Economy Transition: A Systematic Literature Review	Web of Science	83
2021	Dantas, de Souza, Destro, Hammes, Rodriguez ve Soares	How The Combination of Circular Economy and Industry 4.0 Can Contribute Towards Achieving the Sustainable Development Goals	Web of Science, Scopus	432
2021	Romero, Castro, Ortiz, Khalaef ve Vargas	Synergy Between Circular Economy and Industry 4.0: A Literature Review	Web of Science	100
2021	Tavares Lehmann ve Varum	Industry 4.0 and Sustainability: A Bibliometric Literature Review	Web of Science	29
2020	Awan, Sroufe ve Shahbaz	Industry 4.0 and the Circular Economy: A Literature Review and Recommendations for Future Research	Web of Science	393
2020	Bag ve Pretorius	Relationships between Industry 4.0, Sustainable Manufacturing and Circular Economy: Proposal of a Research Framework	Web of Science	328
2020	Rosa, Sassanelli, Urbinati, Chiaroni ve Terzi	Assessing Relations Between Circular Economy and Industry 4.0: A Systematic Literature Review	Web of Science	478

Yukarıda Tablo 3’de yer alan çalışmaların ortak özelliği, Endüstri 4.0 ile Döngüsel Ekonomi arasındaki ilişkiyi bütüncül ve sistematik bir bakış açısıyla ele almalarıdır. Literatürde öne çıkan bu çalışmaların büyük bir kısmı, sistematik literatür taraması, bibliyometrik analiz veya kavramsal çerçeve geliştirme yöntemlerini kullanarak, dijital teknolojilerin (Nesnelerin İnterneti, Büyük Veri Analitiği, Siber-Fiziksel Sistemler ve Yapay Zekâ gibi) döngüsel ekonomi uygulamalarını nasıl desteklediğini ortaya koymaktadır. Ortak bir vurgu olarak, Endüstri 4.0 teknolojilerinin

kaynak verimliliğini artırma, atık oluşumunu azaltma, kapalı döngü değer zincirleri oluşturma ve sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimini güçlendirme potansiyeline sahip olduğu belirtilmektedir. Bununla birlikte bu çalışmalar, dijitalleşmenin döngüsel iş modellerine geçişte stratejik bir kolaylaştırıcı (enabler) rol üstlendiğini ve firmaların rekabet gücünü, operasyonel şeffaflığını ve çevresel performansını eş zamanlı olarak iyileştirebildiğini göstermektedir. Literatürdeki bu ortak yaklaşım, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonominin birbirinden bağımsız değil, aksine karşılıklı olarak güçlenen ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlayan tamamlayıcı dönüşüm paradigmaları olduğunu ortaya koymaktadır.

İncelenen literatür kapsamında, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi ilişkisini ele alan Türkçe çalışmaların sayısının oldukça sınırlı olduğu ve mevcut çalışmaların uluslararası literatürle karşılaştırıldığında atıf sayısının düşük kaldığı görülmektedir. TR Dizin’de yer alan sınırlı sayıdaki çalışmaların büyük ölçüde kavramsal inceleme veya betimleyici analizlerle sınırlı kaldığı, ampirik ve sistematik çalışmaların ise oldukça az olduğu dikkat çekmektedir. Atıf sayılarının düşük olması, bu alandaki akademik birikimin henüz erken bir gelişim aşamasında olduğunu ve konunun ulusal literatürde yeterince derinlemesine ele alınmadığını göstermektedir. Bu durum, Türkiye bağlamında Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi entegrasyonuna yönelik nicel, nitel ve karma yöntemlerle yürütülecek özgün araştırmalara duyulan ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, söz konusu alanda yapılacak yeni çalışmaların hem ulusal literatürü zenginleştirmesi hem de uluslararası literatürle daha güçlü bir etkileşim kurarak Türkiye’nin sürdürülebilirlik ve dijital dönüşüm politikalarına akademik katkı sağlaması beklenmektedir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada gerçekleştirilen sistematik literatür incelemesi, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi arasındaki ilişkinin son yıllarda akademik ilginin giderek arttığı bir araştırma alanı haline geldiğini göstermektedir. Web of Science, Scopus, TR Dizin ve Ulusal Tez Merkezi veri tabanlarında yapılan taramalar sonucunda elde edilen bulgular, literatürün büyük ölçüde kavramsal çerçeveler, sistematik literatür taramaları ve bibliyometrik analizler etrafında yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Bu durum, alanın teorik olarak olgunlaşma sürecinde olduğunu, ancak uygulamaya dönük ampirik kanıtların henüz sınırlı kaldığını göstermektedir. İncelenen çalışmaların önemli bir kısmı, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi uygulamalarını destekleyici bir rol üstlendiği konusunda ortak bir görüş ortaya koymaktadır. Özellikle nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği ve siber-fiziksel sistemler; ürün yaşam döngüsünün izlenmesi, kaynak kullanımının optimize edilmesi ve kapalı döngü değer zincirlerinin oluşturulması açısından öne çıkan teknolojiler olarak değerlendirilmektedir. Literatürde IoT’nin, kestirimci bakım, tersine lojistik ve yeniden üretim süreçlerini mümkün kılarak ürünlerin kullanım ömrünü uzattığı ve atık oluşumunu azalttığı sıklıkla vurgulanmaktadır. Bu bulgular, Endüstri 4.0’ın döngüsel ekonomi açısından yalnızca operasyonel verimlilik sağlayan bir araç değil, aynı zamanda stratejik bir dönüşüm unsuru olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, literatürün önemli bir bölümünün teknoloji merkezli bir bakış açısına sahip olduğu dikkat çekmektedir. Dijital teknolojilerin sunduğu teknik olanaklar ayrıntılı bir şekilde ele alınırken, bu teknolojilerin örgütsel yapılar, yönetim mekanizmaları ve paydaş ilişkileri üzerindeki etkilerinin görece sınırlı biçimde incelendiği görülmektedir. Oysa döngüsel ekonomi uygulamalarının başarısı, sadece teknolojik altyapıya değil; aynı zamanda firmaların dönüşüme hazır olma düzeyine, paydaşlar arası iş birliğine ve kurumsal kültüre de bağlıdır. Bu bakımdan, literatürde sıklıkla vurgulanan bir diğer bulgu, paydaş beklentilerinin yeterince sistematik biçimde ele alınmamış olmasıdır.

Tablo 3’te yer alan çalışmalar incelendiğinde, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi entegrasyonunun sürdürülebilirlik performansı, tedarik zinciri yönetimi ve iş modeli yeniliği bağlamında ele alındığı görülmektedir. Özellikle sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle ilişkilendirilen çalışmalar, dijital teknolojilerin çevresel ve ekonomik faydaları eş zamanlı olarak sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Ancak bu çalışmaların çoğu, önerilen çerçevelerin uygulamada nasıl hayata geçirileceği ve farklı sektörlerde nasıl sonuçlar doğuracağı konusunda sınırlı ampirik kanıt sunmaktadır. Bu durum, literatürde “uygulama boşluğu” olarak değerlendirilebilecek bir alanın varlığına işaret etmektedir. Ulusal literatür açısından değerlendirildiğinde ise, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi konusundaki Türkçe çalışmaların sayısının oldukça sınırlı olduğu ve mevcut çalışmaların büyük ölçüde betimleyici nitelik taşıdığı görülmektedir. Atıf sayılarının düşük olması, bu alanın Türkiye bağlamında henüz erken bir gelişim aşamasında olduğunu göstermektedir. Bu durum aynı zamanda önemli bir araştırma fırsatına da işaret etmektedir. Özellikle Türkiye’nin sanayi yapısı, ihracat odaklı üretim modeli ve dijital dönüşüm politikaları dikkate alındığında, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi entegrasyonunun ülke özelinde ele alınması literatüre özgün katkılar sunma potansiyeline sahiptir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışmanın bulguları Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi literatüründe teknolojik olanaklar ile sosyal ve örgütsel boyutlar arasında bir denge kurulması gerektiğini ortaya koymaktadır. Dijital teknolojilerin sunduğu potansiyel açık olmakla birlikte, bu potansiyelin hayata geçirilebilmesi; paydaş beklentilerinin anlaşılması, politika yapıcılarının destekleyici rolü ve firmaların stratejik yönelimleriyle yakından ilişkilidir.

Dolayısıyla, gelecekte yapılacak çalışmaların yalnızca teknolojik çözümlere değil, bu çözümlerin hangi koşullar altında, kimler tarafından ve nasıl benimsendiğine odaklanması gerekmektedir.

SONUÇ

Bu çalışma, kurumlar, tedarikçiler, uluslararası kuruluşlar, üreticiler ve tüketicilerin menfaatlerinin ve beklentilerinin önemine değinmek ve gelecekte yapılacak olan araştırmalara yön vermek amacıyla IoT ve Döngüsel Ekonomi literatürüne sistematik bir derleme sunmaktadır. Bu çalışma, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi arasındaki ilişkiyi IoT odağında ele alan literatürü sistematik bir yaklaşımla inceleyerek, alandaki kavramsal eğilimleri, baskın temaları ve araştırma boşluklarını ortaya koymayı amaçlamıştır. Web of Science, Scopus, TR Dizin ve Ulusal Tez Merkezi veri tabanlarında gerçekleştirilen kapsamlı tarama sonucunda elde edilen bulgular, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi uygulamalarını destekleme potansiyelinin literatürde güçlü biçimde kabul edildiğini, ancak bu ilişkinin çoğunlukla kavramsal ve betimleyici düzeyde ele alındığını göstermektedir.

Sistematik literatür incelemesi bulguları, özellikle nesnelerin interneti (IoT) teknolojilerinin döngüsel ekonomi bağlamında; ürün yaşam döngüsü yönetimi, izlenebilirlik, kestirimci bakım, tersine lojistik, yeniden üretim ve kaynak verimliliği gibi mekanizmalar aracılığıyla değer yarattığını ortaya koymaktadır. Çalışmada, güncel IoT ve Döngüsel Ekonomi konusuna dahil olabilecek tüm paydaşların bu dönüşümden nasıl etkilenecekleri, sistematik bir literatür taraması aracılığıyla kavramsal hale getirilmiştir. IoT ve Döngüsel Ekonomi perspektifinden tartışmayı başlatarak paydaşların menfaat ve beklentilerini belirlemek ve gelecekte yapılacak olan çalışmalara araştırma alanı sunmak bu çalışmanın temel iki amacını oluşturmaktadır. Endüstri 4.0, firmaların sürdürülebilir kalkınma fırsatı elde etmeleri bakımında önemli bir yol haline gelmiştir. IoT, teknolojiye yaşanan tüm gelişmelerle birlikte döngüsel ekonomi için önemli etkiler yaratması beklenmektedir. Literatürde öne çıkan çalışmalar, IoT'nin veri temelli karar alma süreçlerini güçlendirdiğini ve kapalı döngü değer zincirlerinin etkin biçimde yönetilmesine katkı sağladığını vurgulamaktadır. Bununla birlikte, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi üzerindeki etkilerinin çoğunlukla teknoloji merkezli ele alındığı; sosyal, örgütsel ve yönetim boyutlarının görece geri planda kaldığı belirlenmiştir.

Çalışmanın sistematik bulguları, literatürde ampirik çalışmaların sınırlı, özellikle paydaş beklentileri, örgütsel hazırlık düzeyi ve kurumsal dönüşüm süreçlerini bütüncül biçimde ele alan araştırmaların yetersiz olduğunu göstermektedir. İncelenen çalışmaların önemli bir kısmı, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi arasındaki sinerjiyi teorik olarak kabul etmekte; ancak bu sinerjinin hangi koşullar altında, hangi paydaşlar aracılığıyla ve hangi sektörlerde daha etkili sonuçlar doğurduğuna ilişkin net ampirik kanıtlar sunmamaktadır. Bu durum, literatürde metodolojik bir boşluk olduğuna işaret etmektedir.

Ayrıca sistematik inceleme, Türkçe literatürde bu konuya yönelik çalışmaların sayısının oldukça sınırlı olduğunu ve mevcut çalışmaların atıf etkisinin düşük kaldığını ortaya koymaktadır. Ulusal literatürde yer alan çalışmaların büyük ölçüde kavramsal nitelikte olması, Türkiye bağlamında Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi entegrasyonunun sektörel, ampirik ve politika temelli boyutlarıyla yeterince ele alınmadığını göstermektedir. Bu durum, ulusal ölçekte yapılacak nicel, nitel ve karma yöntemli çalışmalar için önemli bir araştırma alanı sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma Endüstri 4.0, IoT ve döngüsel ekonomi literatürüne sistematik bir sentez sunarak, dijital teknolojilerin döngüsel ekonomi geçişindeki rolünü paydaş beklentileri ve değer yaratma mekanizmaları çerçevesinde değerlendirmektedir. Elde edilen bulgular, gelecekte yapılacak çalışmaların; sektör bazlı ampirik analizlere, paydaşlar arası etkileşim dinamiklerine ve politika-yönetişim boyutuna odaklanmasının literatüre önemli katkılar sağlayacağını göstermektedir. Bu bağlamda, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi hedefleriyle bütünleştirilmesi, yalnızca teknolojik bir dönüşüm değil, aynı zamanda stratejik, örgütsel ve yönetsel bir dönüşüm süreci olarak ele alınmalıdır. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Döngüsel Ekonomi uygulamalarının entegrasyonuna ilişkin ampirik çalışmalar hali hazırda ilk aşamada kalmıştır. Endüstri 4.0 araçları, ürün-hizmet-iş modeli geliştirilerek daha fazla döngüsel ekonomi desteklenebilir. Endüstri 4.0 araçlarının üretim sistemlerine dahil etmek, döngüsel ekonomi girişimleri uygulanırken paydaşların menfaatlerinin ve beklentilerinin belirlenmesi konusunda yarar sağlayacaktır. Endüstri 4.0, Döngüsel Ekonomi ve Küresel Değer Zinciri arayüzüne ilişkin ampirik araştırma veya literatür incelemesine rastlanmamıştır. Endüstri 4.0'ın ihtiyaçlara cevap verebilmesi için teknoloji altyapısının gittikçe artan bir öneme sahip olduğu açıktır. Endüstri 4.0'ın önemi henüz tam anlamıyla kavranamamış ve neler yapılması gerektiği yeterince anlaşılamamıştır. Teknoloji, döngüsel ekonomileri mümkün kılmak ve yeni bir endüstri inovasyonu dalgasını başlatmak adına tüm sektörler için kullanıma açık bir kavramdır. Politika yapıcılarının; bir politika geliştirirken ve sunarken, sürece tüm ortakları dahil etmeleri gerekmektedir. Bununla birlikte, farklı sektör ve üretim süreçlerinde Endüstri 4.0'ın döngüsel ekonomi üzerindeki etkilerinin incelenmesi farklı sektörler üzerinde bu alandaki bilgi birikimine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Ada, N., Kazancoglu, Y., Sezer, M. D., Ede-Senturk, C., Ozer, I., ve Ram, M. (2021). Analyzing Barriers of Circular Food Supply Chains and Proposing Industry 4.0 Solutions. *Sustainability*, 13(12), 6812.
- Agrawal, R., Wankhede, V. A., Kumar, A., Luthra, S., ve Huisinigh, D. (2022). Progress and Trends in Integrating Industry 4.0 within Circular Economy: A Comprehensive Literature Review and Future Research Propositions. *Business Strategy and the Environment*, 31(1), ss.559-579.
- Alcayaga, A., Wiener, M. ve Hansen, E. G. (2019). Towards a Framework of Smart-Circular Systems: An Integrative Literature Review, *Journal of Cleaner Production*, ss.622–634.
- Atif, S. (2023). Analysing the Alignment between Circular Economy and Industry 4.0 Nexus with Industry 5.0 Era: An Integrative Systematic Literature Review. *Sustainable Development*, 31(4), ss.2155-2175.
- Atif, S., Ahmed, S., Wasim, M., Zeb, B., Pervez, Z., ve Quinn, L. (2021). Towards a Conceptual Development of Industry 4.0, Servitisation, and Circular Economy: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 13(11), 6501.
- Awan, U., Sroufe, R., ve Bozan, K. (2022). Designing Value Chains for Industry 4.0 and a Circular Economy: A Review of the Literature. *Sustainability*, 14(12), 7084.
- Awan, U., Sroufe, R., ve Shahbaz, M. (2020). Industry 4.0 and the Circular Economy: A Literature Review and Recommendations for Future Research, *Business Strategy and the Environment*, 30(1), ss.2038-2060.
- Badea, D., Gorski, A. T., Ranf, D. E., Halmaghi, E. E., ve Gorski, H. (2025). Interferences and Frontiers Between Industry 4.0 and Circular Economy. *Processes*, 13(11), 3579.
- Bag, S., ve Pretorius, J. H.C. (2022). Relationships between Industry 4.0, Sustainable Manufacturing and Circular Economy: Proposal of a Research Framework. *International Journal of Organizational Analysis*, 30(4), ss.864-898.
- Barreiro, G.M. ve Lozano, R. (2020). How Circular is the Circular Economy? Analysing the Implementation of Circular Economy in Organisations. *Business Strategy and the Environment*, ss.3484-3494.
- Bienhaus, F. ve Haddud, A. (2018). Procurement 4.0: Factors Influencing the Digitisation of Procurement and Supply Chains, *Business Process Management Journal*, 24(4), ss. 965–984.
- Birkel, H., ve Müller, J. M. (2021). Potentials of iIndustry 4.0 for Supply Chain Management within the Triple Bottom Line Of Sustainability—A Systematic Literature Review. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125612.
- Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M. ve Saccani, N. (2018). Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies, *Sustainability*, 10(3), 21s.
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M. ve 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), ss.37–44.
- Cagno, E., Neri, A., Negri, M., Bassani, C. A., ve Lampertico, T. (2021). The Role of Digital Technologies in Operationalizing the Circular Economy Transition: A Systematic Literature Review, *Applied Sciences*, 11(8), 3328.
- Cesarino, L. O., Liboni, L. B., Oliveira Stefanelli, N., Oliveira, B. G. ve Stocco, L. C. (2019). Diving into Emerging Economies Bottleneck: Industry 4.0 and Implications for Circular Economy, *Management Decision*, 1084, ss.1-23.
- Charnley, F., Tiwari, D., Hutabarat, W., Moreno, M., Okorie, O. ve Tiwari, A. (2019). Simulation to Enable a Data-Driven Circular Economy. *Sustainability*, 11(12), ss.1-16.
- Çetin, M. (2020). Ekonomide Zorunlu Dönüşüm: Doğrusal Ekonomiden Sirküler Ekonomiye Geçiş, *Journal Of European Theoretical and Applies Studies*, 8(2), ss.1-37.
- Dantas, T. E. T., de-Souza, E. D., Destro, I. R., Hammes, G., Rodriguez, C. M. T., ve Soares, S. R. (2021). How the Combination of Circular Economy and Industry 4.0 Can Contribute towards Achieving the Sustainable Development Goals. *Sustainable Production and Consumption*, 26, ss.213-227.
- Daú, G., Scavarda, A., Scavarda, L.F., ve Portugal, V.J.T. (2019). The Healthcare Sustainable Supply Chain 4.0: The Circular Economy Transition Conceptual Framework with The Corporate Social Responsibility Mirror. *Sustainability*, 11(12), 19s.

- Dolgui, A., Ivanov, D., Sethi, S. P. ve Sokolov, B. (2019). Scheduling in Production, Supply Chain and Industry 4.0 Systems by Optimal Control: Fundamentals, State-of-The-Art and Applications, *International Journal of Production Research*, 57(2), ss.411–432.
- Eisenreich, A., Füller, J., Stuchtey, M., ve Gimenez-Jimenez, D. (2022). Toward a Circular Value Chain: Impact of the Circular Economy on a Company's Value Chain Processes. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134375.
- Esposito, M. (2017). Where the Circular Economy Meets the Internet of Things. August 12, <https://www.greenbiz.com/article/where-circular-economy-meets-internet-things>
- Franciosi, C., Lambiase, A. ve Miranda, S. (2017). Sustainable Maintenance: A Periodic Preventive Maintenance Model with Sustainable Spare Parts Management, *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), ss.13692–13697.
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 Technologies: Implementation Patterns in Manufacturing Companies. *International Journal of Production Economics*, ss.15–26.
- Gatell, I.S., ve Avella, L. (2024). Impact of Industry 4.0 and Circular Economy on Lean Culture and Leadership: Assessing Digital Green Lean as a New Concept, *European Research on Management and Business Economics*, 30(1), 12s.
- Gebhardt, M., Kopyto, M., Birkel, H., ve Hartmann, E. (2022). Industry 4.0 Technologies as Enablers of Collaboration in Circular Supply Chains: A Systematic Literature Review. *International Journal of Production Research*, 60(23), ss.6967-6995.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., ve Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy-A New Sustainability Paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143(1), ss.757–768.
- Ghaithan, A.M., Alshammakhi, Y., Mohammed, A., ve Mazher, K.M. (2023). Integrated Impact of Circular Economy, Industry 4.0, and Lean Manufacturing on Sustainability Performance of Manufacturing Firms, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 19s.
- Gómez, M.A., González, A.F., ve Luque, A. (2019). A Holonic Framework for Managing the Sustainable Supply Chain in Emerging Economies with Smart Connected Metabolism, Resources, Conservation and Recycling, 141(1), ss.219–232.
- Gupta, S., Chen, H., Hazen, B. T., Kaur, S. ve Santibañez G.E.D.R. (2019). Circular Economy and Big Data Analytics: A Stakeholder Perspective, *Technological Forecasting and Social Change*, 144(1), ss.466–474.
- Güleryüz, Ö. ve Duygulu, E. (2020). “Endüstri 4.0 ve Döngüsel Ekonomi İlişkisi” (Ed. F. Sayın), *Döngüsel Ekonomi Makro ve Mikro İncelemeler*, ss. 361-386, Nobel Yayıncılık, Ankara.
- Halloui, A., Herrou, B., Santos, R. S., Katina, P. F., ve Egbue, O. (2022). Systems-Based Approach to Contemporary Business Management: An Enabler of Business Sustainability in a Context of Industry 4.0, Circular Economy, Competitiveness and Diverse Stakeholders. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133819.
- Hofmann, E. ve Rüsch, M. (2017). Industry 4.0 and The Current Status as well as Future Prospects on Logistics, Computers in Industry, ss.23–34.
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y. ve Do Noh, S. (2016). Smart Manufacturing: Past Research, Present Findings, and Future Directions, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(1), ss.111–128.
- Karamustafa, E.Y., Arsan, B. ve Beşoğlu, K. (2022). Döngüsel Ekonomi ve Endüstri 4.0’ın Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini Geliştirmeye Etkisi: Sistemik Literatür Taraması, *Bilgi Sosyal Bilimler Dergisi*, 24(2), ss.294-323.
- Kerin, M., & Pham, D. T. (2019). A Review of Emerging Industry 4.0 Technologies in Remanufacturing, *Journal of Cleaner Production*, 237(1), ss.1-39.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions, Resources, Conservation and Recycling, ss.221–232.
- Köksal, M. (2024). Endüstri 4.0 Teknolojileri ve Döngüsel Ekonominin Sürdürülebilir İşletme Performansına Etkisi: Asansör Sektöründe Uygulama”, *Verimlilik Dergisi*, 58(4), ss.601-622.
- Kusiak, A. (2019). Fundamentals of Smart Manufacturing: A Multi-Thread Perspective. *Annual Reviews in Control*, 47(1), ss.214–220.

- MacArthur, E. (2013). *Towards The Circular Economy: Opportunities for The Consumer Goods Sector*. UK: Ellen MacArthur Foundation, 112s.
- Majeed, A.A. ve Rupasinghe, T.D. (2017). Internet of Things (IoT) Embedded Future Supply Chains for Industry 4.0: An Assessment from an ERP Based Fashion Apparel and Footwear Industry. *International Journal of Supply Chain Management*, 6(1), ss.25–40.
- Manavalan, E. ve Jayakrishna, K. (2019). A Review of Internet of Things (IoT) Embedded Sustainable Supply Chain for Industry 4.0 Requirements, *Computers and Industrial Engineering*, 127, ss.925–953.
- Morales, B.C.M. ve Zartha, S.J.W. (2020). Circular Economy in Latin America: A Systematic Literature Review, *Business Strategy and the Environment*, 29(1), ss.2479–2497.
- Munn, Z., Stern, C., Aromataris, E., Lockwood, C., ve Jordan, Z. (2018). What Kind of Systematic Review Should I Conduct? A Proposed Typology and Guidance for Systematic Reviewers in the Medical and Health Science, *BMC Medical Research Methodology*, 18(1), ss.1–9.
- Murray, A., Skene, K. ve Haynes, K. (2017). The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of The Concept and Application in a Global, *Journal of Business Ethics*, 140(3), ss.369–380.
- Nascimento, D.L.M., Alencastro, V., Quelhas, O.L.G., Caiado, R.G.G., Garza, R.J.A., Lona, L.R. ve Tortorella, G. (2019). Exploring Industry 4.0 Technologies to Enable Circular Economy Practices in A Manufacturing Context: A Business Model Proposal, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(3), ss.607–627.
- Nobre, G. C. ve Tavares, E. (2017). Scientific Literature Analysis on Big Data and Internet of Things Applications on Circular Economy: A Bibliometric Study, *Scientometrics*, 111(1), ss.463–492.
- Nord, J. H., Koohang, A. ve Paliszkievicz, J. (2019). The Internet of Things: Review and Theoretical Framework. *Expert Systems with Applications*, 133(1), ss.97–108.
- Okorie, O., Salonitis, K., Charnley, F., Moreno, M., Turner, C. ve Tiwari, A. (2018). Digitisation and the Circular Economy: A Review of Current Research and Future Trends, *Energies*, 11(11), ss.1–31.
- Perey, R., Benn, S., Agarwal, R. ve Edwards, M. (2018). The Place of Waste: Changing Business Value for the Circular Economy, *Business Strategy and the Environment*, 27(5), ss.631–642.
- Rajput, S. ve Singh, S. P. (2019). Connecting Circular Economy and Industry 4.0. *International Journal of Information Management*, ss.98–113.
- Romero, C.A.T., Castro, D.F., Ortiz, J.H., Khalaf, O.I., ve Vargas, M.A. (2021). Synergy between Circular Economy and Industry 4.0: A Literature Review, *Sustainability*, 13(1), 18s.
- Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D. ve Terzi, S. (2020). Assessing Relations between Circular Economy and Industry 4.0: A Systematic Literature Review, *International Journal of Production Research*, 58(6), ss.1662–1687.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P. ve Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*. Boston Consulting Group, 9(1), ss.54–89.
- Sahu, A., Agrawal, S., ve Kumar, G. (2022). Integrating Industry 4.0 and Circular Economy: A Review. *Journal of Enterprise Information Management*, 35(3), ss.885–917.
- Sarc, R., Curtis, A., Kandlbauer, L., Khodier, K., Lorber, K. E. ve Pomberger, R. (2019). Digitalisation and Intelligent Robotics in Value Chain of Circular Economy Oriented Waste Management-A Review, *Waste Management*, ss.476–492.
- Scuotto, V., Ferraris, A. ve Bresciani, S. (2016). Internet of Things: Applications and Challenges in Smart Cities: A Case Study of IBM Smart City Projects, *Business Process Management Journal*, 22(2), ss.357–367.
- Stock, T. ve Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia Cirp*, 40(1), ss.536–541.
- Su, B., Heshmati, A., Geng, Y. ve Yu, X. (2013). A Review of the Circular Economy in China: Moving from Rhetoric to Implementation, *Journal of Cleaner Production*, 42(1), ss.215–227.
- Szalavetz, A. (2019). Industry 4.0 and Capability Development in Manufacturing Subsidiaries, *Technological Forecasting and Social Change*, 145(1), ss.384–395.

- Tao, F., Qi, Q., Liu, A. ve Kusiak, A. (2018). Data-Driven Smart Manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, 48, ss.157–169.
- Tavares-Lehmann, A. T., ve Varum, C. (2021). Industry 4.0 and Sustainability: A Bibliometric Literature Review. *Sustainability*, 13(6), 3493.
- Toth-Peter, A., de Oliveira, R. T., Mathews, S., Barner, L., ve Figueira, S. (2023). Industry 4.0 as an Enabler in Transitioning to Circular Business Models: A Systematic Literature Review. *Journal of Cleaner Production*, 393, 136284.
- Turner, C., Moreno, M., Mondini, L., Salonitis, K., Charnley, F., Tiwari, A. ve Hutabarat, W. (2019). Sustainable Production in a Circular Economy: A Business Model for Re-Distributed Manufacturing. *Sustainability*, ss.1-19
- Tümay Ateş, K. (2025). Endüstri 4.0 Bileşenlerinin Döngüsel Ekonomi Üzerindeki Rolü: Regresyon Analizine Dayalı Ampirik Bir Çalışma, *Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi*, 5(2), ss.266-277.
- Türkyılmaz, S. (2024). Endüstri 4.0 ve Endüstriye Nesnelerin İnterneti: Uygulama, Fırsat ve Zorluklar-Literatür Taraması, *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 25(2), ss.153-172.
- Voulgaridis, K., Lagkas, T., Angelopoulos, C. M., ve Nikolettseas, S. E. (2022). IoT and Digital Circular Economy: Principles, Applications, and Challenges. *Computer Networks*, 219, 109456.
- Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D. ve Zhang, C. (2016). Towards Smart Factory for Industry 4.0: A Self-Organized Multi-Agent System with Big Data Based Feedback and Coordination, *Computer Networks*, 101(1), ss.158–168.
- Wen, Z., Hu, S., De Clercq, D., Beck, M. B., Zhang, H., Zhang, H. ve Liu, J. (2018). Design, Implementation, and Evaluation of an Internet of Things (IoT) Network System for Restaurant Food Waste Management, *Waste Management*, ss.26–38.
- Wollschlaeger, M., Sauter, T. ve Jasperneite, J. (2017). The Future of Industrial Communication: Automation Networks in The Era of the Internet of Things and Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(1), ss.17-27.
- Yang, S., Raghavendra, M. R. A., Kaminski, J. ve Pepin, H. (2018). Opportunities for Industry 4.0 to Support Remanufacturing, *Applied Sciences*, 8(7), 11s.
- Zheng, P., Wang, Z., Chen, C. ve Pheng, L. (2019). Advanced Engineering Informatics Review Article A Survey of Smart Product-Service Systems: Key Aspects, Challenges and Future Perspectives, *Advanced Engineering Informatics*, 42(1), 34s.
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E. ve Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review, *Engineering*, 3(5), ss.616–630