



Akıllı ve Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetiminin Hazırlık ve Olgunluk Düzeyinin Değerlendirilmesi için Geometrik Ortalamaya Dayalı Yeni Bir Model Önerisi

A New Evaluation Model for the Readiness and Maturity Level of Intelligent and Sustainable Supply Chain Management Based on Geometric Mean

Sercan Demir¹ , Mehmet Akif Gündüz² , Turan Paksoy³ 

Öz

Son yıllarda küreselleşme ve küresel rekabetteki artış, artan teknolojik büyüme hızı, müşteri taleplerindeki çeşitlilik ve tedarik zinciri süreçlerinin giderek karmaşıklaşması firmaların tedarik zinciri stratejilerine akıllı ve sürdürülebilir paradigmlar eklemelerine neden olmuştur. Tedarik zinciri oyuncuları arasındaki gerçek zamanlı bilgi paylaşımı ve zincirin her bir basamağının etkin koordinasyonu, tedarik zincirinin verimli şekilde yönetimi için önemli rol oynamaktadır. Bu da geleneksel tedarik zincirinden dijital tedarik zincirine dönüşüm ile mümkündür. Endüstri 4.0 olarak adlandırılan ve 2011 yılında Almanya'da doğan Dördüncü Sanayi Devrimi bilgi teknolojileri, nesnelerin interneti, yapay zeka, bulut bilişim teknolojisi, otonom araçlar, robotik sistemler, sensor ve otomasyon ağları, sanal ve artırılmış gerçeklik gibi teknolojilerin üretim süreçlerine yoğun biçimde entegrasyonunu hedef alan yenilikçi bir paradigmadır. Ne var ki, Endüstri 4.0'a uyum ve uyum sonrası olgunluk dönemi birçok firma için beklenmedik problemlere yol açabilmektedir. Akıllı fabrikaların kurulmasında ve dijital dönüşümün uygulanmasında en büyük sorunlardan biri, Endüstri 4.0 yetkinliklerinin tüm operasyonlara eş zamanlı olarak etkin şekilde uygulanamamasıdır. Bu bağlamda, firmaların Endüstri 4.0'a hazırlık ve uyum sonrası olgunluk düzeylerinin niceliksel ölçümü ve değerlendirilmesi, üst yönetim için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmanın amacı firmaların Endüstri 4.0'a hazırlık ve olgunluk düzeylerinin daha iyi anlaşılabilirliği için, dijital tedarik zincirlerinin akıllı ve sürdürülebilir boyutta olgunluk düzeylerinin eş zamanlı ölçülebilmesine olanak sağlayan bir model önermektir. Modelin uygulandığı nümerik örnekte, her bir Endüstri 4.0 aracının sürdürülebilirlik boyutlarına ne derece uyum sağladığı belirlenmiştir. Örneğin, eklemeli imalat ve artırılmış gerçeklik sürdürülebilirliğin ekonomik boyutunda yüksek olgunluk skoru alırken, çevresel ve sosyal boyutlara göre daha düşük skor almıştır. Benzer şekilde, yapay zeka çok düşük olgunluk seviyesinde kalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, Akıllı ve Sürdürülebilir Tedarik Zincirleri, Hazırlık ve Olgunluk Düzeyi, Model Önerisi

ABSTRACT

Recently, companies have added smart and sustainable paradigms to their supply chain strategies as a result of globalization and increased global competition, increasing technological growth rate, diversity in customer demands, and increasing complexity in supply chain processes. Real-time information sharing among supply chain players and the effective coordination of each step of the chain are critical for efficient supply chain management. This is made possible by the transition from the traditional supply chain to the digital supply chain. The Fourth Industrial Revolution, also known as Industry 4.0, was coined for the first time in Germany in 2011. It is an innovative paradigm with the goal of intensely integrating technologies, such as information technologies, the Internet of Things, artificial intelligence, cloud computing technology, autonomous vehicles, robotic systems, sensor and automation networks, and virtual and augmented reality into production processes. However, for many companies, the adaptation of Industry 4.0 and the subsequent maturity period may present unexpected challenges. One of the most difficult challenges in

Başvuru/Submitted: 13.11.2021 • **Revizyon Talebi/Revision Requested:** 08.02.2022 • **Son Revizyon/Last Revision Received:** 15.02.2022 • **Kabul/Accepted:** 22.03.2022

¹ **Sorumlu yazar/Corresponding author:** Sercan Demir (Dr. Öğretim Gör.), Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye. E-mail: sercanxdemir@gmail.com ORCID: 0000-0003-0764-9083

² Mehmet Akif Gündüz (Dr. Öğretim Üyesi), KTO Karatay Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü, Konya, Türkiye. E-mail: akifgunduz@gmail.com ORCID: 0000-0002-3884-1409

³ Turan Paksoy (Prof. Dr.), Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havaçılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havaçılık Yönetimi Bölümü, Konya, Türkiye. E-mail: tpkasoy@yahoo.com ORCID: 0000-0001-8051-8560

Atf/Citation: Demir, S., Gündüz, M.A., & Paksoy, T. (2022). Akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminin hazırlık ve olgunluk düzeyinin değerlendirilmesi için geometrik ortalamaya dayalı yeni bir model önerisi. *Journal of Transportation and Logistics*, 7(1), 95-115. <https://doi.org/10.26650/JTL.2022.1023071>

establishing smart factories and implementing digital transformation is that Industry 4.0 competencies cannot be effectively applied to all operations simultaneously. In this context, quantitative measurement and evaluation of firms' maturity levels following Industry 4.0 preparation and adaptation is critical for senior management. The goal of this study is to propose a model for measuring the maturity level of digital supply chains while considering smart and sustainable dimensions. We determined the extent to which each Industry 4.0 tool was compatible with the sustainability dimensions in the numerical example where the model was applied. For example, although additive manufacturing and augmented reality receive high scores in the economic dimension of sustainability, they receive lower scores in the environmental and social dimensions. Similarly, although horizontal and vertical systems integration has high levels of maturity in all three sustainability dimensions, artificial intelligence has an exceptionally low level of maturity.

Keywords: Industry 4.0, Smart and Sustainable Supply Chains, Level of Readiness and Maturity, Model Proposal

Extended Abstract

Since the beginning of industrialization, technological leaps have resulted in paradigm shifts known as “Industrial Evolutions.” So far, three industrial revolutions have led to paradigm shifts in manufacturing: mechanization through steam power, mass production in assembly lines, and automation by information technology. Recently, researchers and policymakers worldwide have increasingly called for the term Industry 4.0 to be used to describe the impending changes that the industries will face because of the new era of digitization. This revolution is based on the increased availability of digital connectivity technologies, which are being used to reorganize supply chains. Industry 4.0 promotes decentralization of decision-making and information distribution in each entity that makes up the overall system. This decentralization promotes the flexibility and agility of systems by increasing their responsiveness and autonomy. Simultaneously, companies are confronted with new opportunities and challenges as public awareness of social, environmental, and economic sustainability concerns grows. The emergence of smart technologies calls into question business leaders' models and imposes two major challenges. The first challenge is to envision how these technologies can be used to transform supply chain processes, and the second is to master these smart technologies to create new products or services. Ensuring sustainability while matching these critical business skills will be a critical issue in this new era.

Various maturity models are available in the literature to support companies in their digitization efforts. Essentially, these models are concerned with the organization's digital maturity. However, available readiness maturity models do not address sustainability issues and overlook a fundamental aspect of the digital revolution: the opportunity to redefine the company's mission through a strategic positioning review. As a result of this redefinition, companies that have traditionally been oriented toward business objectives are being compelled to refocus their activities on promoting social welfare, environmental responsibility, and economic value generation. We propose a novel, smart, and sustainable supply chain readiness and maturity approach in this study. In the context of supply chain sustainability in economic, environmental, and social dimensions, our model conceptualizes the extent to which Industry 4.0 tools are understood (understanding score), applied (implementation score), and contribute to organizational goals (development score). The awareness and knowledge of the available smart technologies are displayed in the understanding dimension. Moreover, the adoption

of smart technologies within supply chain processes is implied by the implementation dimension. The third dimension, development, represents the organization's readiness to progress with its digital transformation. Our model consists of five steps. A questionnaire is used to collect scores on understanding, implementation, and contribution to development in three sustainability dimensions for each of the 12 tools in the first step. As a result, the initial tool maturity matrix is obtained, with the rows consisting of 12 Industry 4.0 tools and the columns consisting of understanding, implementation, and development scores in the three dimensions of sustainability. The tool-dimension score for each of the 12 Industry 4.0 tools is calculated in the second step using the initial tool maturity matrix values by taking the geometric mean of the three dimensions of sustainability. At the third and fourth steps, a total readiness and maturity score is calculated for each sustainability dimension and the enterprise, respectively. Finally, the fifth step computes an overall smart and sustainable supply chain readiness and maturity score. To demonstrate the applicability of the proposed model, we conduct a case study in the automotive manufacturing industry. By combining its three dimensions, we can assess an organization's readiness and maturity to begin the transition to Industry 4.0 while taking sustainability concerns into account. Our model enables decision-makers to assess the current situation using a readiness and maturity approach, measure performance, and set goals to support continuous development and innovation activities in the adoption of smart technologies to supply chain processes.

1. Giriş

Endüstri 4.0 olarak da adlandırılan Dördüncü Sanayi Devrimi, günümüzde tedarik zincirlerinin dijitalleşmesine sebep olmaktadır. Bu dijitalleşme sadece üretim hattının değil tüm işletme operasyonlarının dijitalleşmesi olarak düşünülmelidir. Bu yeni kavram akıllı tedarik zinciri olarak adlandırılmaktadır. Firmaların ve sektörlerin bu operasyonel dijitalleşmede ne seviyede oldukları Endüstri 4.0 olgunluk modellerinin ilgi alanıdır. Küreselleşen ve rekabetin arttığı günümüz dünyasında tedarik zincirinin sürdürülebilirliği işletmeler için hayati öneme sahiptir. Dolayısıyla, Endüstri 4.0'ın getirdiği dijital dönüşümle ortaya çıkan akıllı tedarik zinciri, sürdürülebilirlikle bağdaştırılması gereken bir kavram konumuna gelmektedir.

Olgunluk modelleri, belirli bir ilgi alanının olgunluğunu veya gelişim durumunu tanımlayan kavramsal yapılardır. Sanayide, olgunluk modelleri, belirli bir sektördeki bir şirketin mevcut olgunluk seviyesini veya gelecekteki bir hedefle ilgili bir süreci saptamak ve ölçmek için kullanılan stratejik bir araçlardır (Santos ve Martinho, 2019). Kavramsal olarak olgunluk modelleri, belirli bir hedefe ulaşmak amacıyla nitel ve nicel özellikleri değişen bir unsurun gelişimini değerlendirmektedir. Dolayısıyla olgunluk modelleri, olgunlaşan unsurların yeteneklerini değerlendirmek ve önemli adımların atılarak olgunluklarının daha yüksek bir seviyeye çıkarılmasını sağlayan güçlü araçlardır (Kohlegger vd., 2009).

Firmalar rekabetçi hale gelmek veya kalmak için dijital dönüşümün neresinde olduklarını değerlendirmek ve Endüstri 4.0 faydalanma oranlarını ölçmek zorundadırlar. Bu yüzden Endüstri 4.0'a nüfuz etmelerinin ölçümü ve gerekli eylemlerin icra edilmesi anlamlıdır (Lichtblau vd., 2015). Bir şirketin dijital dönüşümü, mevcut durumun net bir görünümü ve gelecekteki dijitalleşme eğilimleri boyunca yönetime rehberlik edecek olan stratejik bir plan ile başlamalıdır. Endüstri 4.0 hazırlık ölçümleri ve olgunluk modelleri, bir şirketin dijital dönüşümü için uzun vadeli hedeflere ulaşmak konusunda hem rekabetçi kıyaslama hem de stratejik yol haritası oluşturmada yönetimi destekleyebilmektedir (Rajnai ve Kocsis, 2018). Birçok hazırlık ve olgunluk modelleri, şirketlere Endüstri 4.0'ı hangi alanlarda ve hangi hızda kurmaları gerektiği konusunda daha kolay ve hızlı kararlar almada yardımcı olabilmektedir (Basl ve Doucek, 2019).

Tedarik zinciri yönetimi (TZY) kavramının ortaya çıkışı 1980'lerin başlarına kadar dayanmaktadır (Ahi ve Searcy, 2013). Literatürde sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimine (STZY) artan ilgi, işletmeler tarafından ne tür sürdürülebilir tedarik zinciri (STZ) stratejilerinin kullanıldığına dair önemli bilgiler vermektedir. STZY, konuyu daha geniş bir perspektiften ele alması ve daha geniş performans hedefleri yelpazesine sahip olması nedeniyle sürdürülebilirliğin çevresel ve sosyal boyutlarını dikkate almaktadır (Seuring ve Müller, 2008). İşletmeler uzun vadede ekonomik performansını artırmayı ve böylece TZY'ye ekonomik, sosyal ve çevresel perspektifleri entegre ederek ekonomik yaşamı uzatmayı amaçlamaktadırlar (Carter ve Rogers, 2008). TZ sürdürülebilirliği, yenilikçi stratejiler ve taktiksel teknolojiler kullanılarak kurumsal hedeflere ulaşırken (Kim vd., 2014) mal ve hizmetlerin yaşam döngüsü boyunca çevresel, sosyal ve ekonomik etkilerin yönetilmesi ve iyi yönetişim uygulamalarının teşvik edilmesidir (Sisco vd., 2011). Bu

bakış açısından, STZY, sürdürülebilirliğin üç sac ayağı olan ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlardan kaynaklı ve müşteriler ve paydaşların ihtiyaçlarından türetilen örgütsel amaçlara ulaşırken, tedarik zinciri boyunca malzeme, bilgi ve sermaye akışlarının ve şirketler arasındaki iş birliğinin yönetimidir (Seuring ve Müller, 2008).

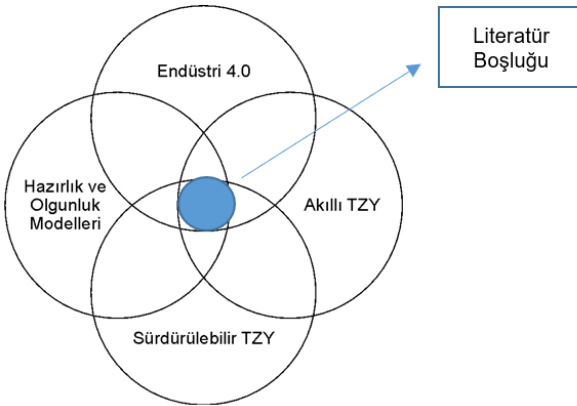
Günümüzde rekabet daha da yoğunlaşmakta ve müşteriler giderek daha talepkâr hale gelmektedir. Bu nedenle şirketler, tüm seviyelerde daha akıllı, daha şeffaf ve daha esnek hale gelen tedarik zincirine sürekli uyum sağlamalıdır (Prinz vd., 2016). Genel amaç, artan gereksinimleri karşılayan ve izlenebilirliği taahhüt eden kişiselleştirilmiş ürün ve hizmetler sunarken maliyetleri ve teslim sürelerini azaltmak ve yenilikçi olmaktır (Barreto vd., 2017). Endüstri 4.0 kavramı, endüstriyel araçların, Nesnelerin İnterneti, büyük veri, siber-fiziksel sistemler ve yapay zeka gibi bir takım dijital teknolojiler ile modernizasyonundan yararlanılarak önceki kavramların üzerine kurulmasıdır. Nesnelerin İnterneti, makineler ve cihazlar gibi nesnelere arasında gerçek zamanlı iletişime, iş birliğine ve dinamik bağlantılı bir ortamda fiziksel ve sanal dünya arasındaki bağlantıya olanak tanıyan ve uzak hizmetlere erişim sağlayan akıllı bilişim teknolojileri altyapısı anlamına gelmektedir (Tao vd., 2017). Siber-fiziksel sistemler, çevresini algılamak için sensörler ile donatılmış, dijital ağlar yoluyla birbirine bağlı fiziksel süreçlere etki edebilen ve onlara yardımcı olmak için uzaktan hizmetleri kullanabilen özerk yerleşik sistemlerdir (Lee, 2008). Robotik ve otonom sistemler, entegre sensörler ve standart arayüzlerle birbirine bağlanan modüler üretim sistemleridir (Wong vd., 2017). Eklemeli imalat, biçimsiz bir malzemenin ardışık katmanlarını birleştirerek malların veya parçaların üretilmesidir (Gausemeier vd., 2017, s. 3). Artırılmış gerçeklik, görsel öğeler, ses veya diğer duyuşsal uyaranları kullanan gerçek fiziksel dünyanın gelişmiş bir türevidir (Kenton, 2018). Simülasyon, incelenmekte olan bir sistemin davranışının birçok farklı özelliğini taklit eden bir modelle denenmesi ve bu davranışın simüle edilen model tarafından test edilmesidir (White ve Ingalls, 2015). Yatay ve dikey sistem entegrasyonu, şirketleri, departmanları, işlevleri ve yetenekleri daha uyumlu hale getiren şirketler arası ve evrensel veri entegrasyon ağıdır (Rüßmann vd., 2015). Bulut bilişim, İnternet üzerinden hizmet olarak sunulan uygulamalar ve bu hizmetleri sağlayan veri merkezlerindeki donanım ve sistem yazılımlarını içermektedir (Hayes, 2008). Siber güvenlik; siber saldırılara, sistem güvenlik açıklarına, siber tehditlere ve risklere karşı önlemleri kapsayan sistemlerdir (Lezzi vd., 2018). Büyük veri analitiği, “ürün yaşam döngüsünden üretilen büyük miktarda yapılandırılmış, yarı yapılandırılmış ve yapılandırılmamış veri” anlamına gelmektedir (Qi ve Tao, 2018). Yapay zeka; görüntü işleme, doğal dil işleme, robotik, makine öğrenmesi vb. ile ilgili bilişsel bir bilimdir (Lee vd., 2018). Makine öğrenmesi; verileri, ön işleme, veri eğitimi, öğrenme modeli uygulaması ve değerlendirme aşamalarında dönüştüren bir algoritmadır (Candanedo, 2018). Blok Zincir Teknolojisi, “tamamen halka açık, sayısız kullanıcı tarafından sürekli olarak güncellenen ve birçoğunun bozulması imkânsız olduğu düşünülen ekonomik işlemlerin dijital defteri” anlamına gelmektedir (Carlozo, 2017). Bu çeşitli kavramlar, robotik ve otomasyonun uzantıları ve endüstriyel dijitalleşmenin temel araçları olarak düşünülebilir (Monostori, 2014). Endüstri 4.0, bilişim teknolojilerindeki yenilikler yoluyla nesnelere ve / veya aktörlerin, aynı zamanda gerçek dünya ve sanal dünyanın güçlü bir şekilde birbirine bağlanmasına dayanmaktadır (El Kadiri vd., 2016).

Bu, endüstriyel ekosistemi daha geniş bir şekilde etkilemekte ve “akıllı tedarik zinciri yönetimi” olarak tanımlanan tedarik zinciri yönetimi dünyasını da dönüştürmektedir.

Bu çalışmanın amacı akıllı ve sürdürülebilir tedarik zincirlerinin Endüstri 4.0’a adaptasyonunu ölçebilen bir olgunluk modeli önerisi sunmaktır. Bu kapsamda, öncelikle Endüstri 4.0, olgunluk modelleri, sonrasında akıllı ve sürdürülebilir tedarik zincirleri sırasıyla ele alınacaktır. İkinci bölümde kapsamlı bir literatür araştırması ve araştırma boşluğuna yer verilirken, önerilen model üçüncü bölümde sunulmuştur. Dördüncü bölümde, modelin uygulanabilirliği örnek olay çalışması üzerinden test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, beşinci bölümde sunulmuştur.

2. Literatür Araştırması

Bu çalışmada Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik uygulamaları birlikte ele alındığından dolayı, literatür araştırması bölümünde ilk olarak Endüstri 4.0 kavramı, sonra da sürdürülebilirlik kavramı incelenmiştir. Daha sonra ikisinin kesişim noktasında akıllı tedarik zinciri yönetimi incelenmiştir. Şekil 1’deki Venn şemasında bu bölümün içeriği ve çalışmamızda odaklandığımız ve literatürde boşluk olarak gördüğümüz Akıllı ve Sürdürülebilir TZY Olgunluk Endeksi alanı gösterilmektedir.



Şekil 1. Araştırma Yönü ve Literatür İçeriği

2.1 Endüstri 4.0 Hazırlık Modellerine Yönelik Literatür Araştırması

Ülkeler arasında Endüstri 4.0’a hazırlık karşılaştırmasına ilişkin ilk çalışmalardan biri Roland Berger (2014) tarafından yapılmıştır. Yazar, Avrupa ülkeleri ve Çin’i, teknolojik potansiyel ve GSYİH’deki üretim faaliyetlerinin yüzdesi açısından önemli farklılıkları göstererek dört küme halinde değerlendirmektedir. Çalışmaya göre öncü ülkelerde (Almanya, İrlanda, Avusturya ve İsviçre) Endüstri 4.0 hazırlık düzeyinin yüksek olmasının yanında, imalat sektörünün GSYİH’deki payında yüksek olduğu görülmektedir. Potansiyeli yüksek ülkeler (Belçika, Finlandiya, Danimarka, Hollanda, İngiltere ve Fransa) öncü ülkelere benzer şekilde Endüstri 4.0 hazırlık düzeylerinin yüksek olmasına karşın imalat sektörünün GSYİH’deki payının düşük olduğu ülkelerdir. Bu ülkeler, Endüstri 4.0’daki hazırlık potansiyellerini imalat sektöründe çıktıya dönüştürmeyi henüz başaramamış ülkelerdir. Gelenekçi ülkeler (Çek Cumhuriyeti, Slovakya, Slovenya,

Macaristan ve Litvanya) GSYİH’de yüksek sanayi üretimi oranına sahip olmalarına rağmen düşük Endüstri 4.0 hazırlık düzeylerine sahiptirler. Bir diğer ifade ile, güçlü imalat sektörlerini Endüstri 4.0’a hazır hale getirememiş ve yoğun biçimde geleneksel yöntemlerle imalat yapmaktadırlar. Son olarak, tereddütlü ülkeler (İspanya, İtalya, Estonya, Polonya, Hırvatistan ve Bulgaristan) hem GSYİH içinde düşük endüstriyel üretim payına hem de düşük Endüstri 4.0 hazırlık düzeyine sahip ülkelerdir.

Botha (2018) gelecekteki hazırlık ölçümünün yanında gelecekteki hazır olma düzeyi ve endeksine dayanan kavramsal bir model önermektedir. Önerilen yaklaşım, bir işletmenin Endüstri 4.0 için gelecekteki hazırlık seviyesini ölçmekte ve mevcut teknoloji seviyesini, örgütsel davranışı ve olayların gelecekteki şekillenme faktörlerini değerlendirmektedir. De Carolis vd. (2017b) imalat firmalarının dijital olgunluğunu araştırmak ve bir dönüşüm rehberi geliştirmelerine yardımcı olmak için yetenek olgunluk modeli entegrasyonu (YOME) çerçevesine dayanan bir olgunluk değerlendirme yöntemi önermişlerdir. Roland Berger (2014) altyapı, süreçler, veri trafiği ve iş modelleri olmak üzere dört temel faktörü araştırarak şirketlere özgü Endüstri 4.0 olgunluk endeksini hesaplamak için genel bir model sunmaktadır. De Carolis vd. (2017a), şirketleri dijital dönüşüm süreçlerine yönlendirmek için önceki YOME modellerinin ilkelerine dayanan bir Dijital Hazırlık Değerlendirme Olgunluk Modeli (DHDOM) ileri sürmüşlerdir. Ernst ve Frische (2015) ilgili teknolojileri, başarılı bir dijital dönüşümün gerekliliklerini ve stratejik yaklaşımları göz önünde bulundurarak, Nesnelerin İnterneti teknolojisinin gelişimi ile Endüstri 4.0’ın mevcut durumunu araştırmaktadır. Lin vd. (2020) kümelenme analizi kullanan bir olgunluk modeli benimseyerek ve teknolojilerin, süreçlerin ve organizasyonların olgunluk değerlendirmesi ile ilgili konuları ele alarak Tayvanlı şirketlerin akıllı imalata hazırlıklarını incelemişlerdir. Lucato vd. (2019), şirketlerin Endüstri 4.0’a hazır olup olmadığını ölçen ve yöneticilerin Endüstri 4.0’a hazır olma düzeyini artırmak için stratejik eylemleri belirlemelerine yardımcı olan bir model önermektedir. Machado vd. (2019), dönüşüm süreci boyunca karşılaştıkları hazırlık düzeylerini ve teknik zorlukları belirlemek için birçok öz kontrol aracı uygulayarak İsveçli ve Alman şirketlerin dijital hazırlıklarını incelemişlerdir. Basl (2017) ile Basl ve Kopp (2017) bir anket uygulayarak Çek şirketlerinin Endüstri 4.0’a hazırlık seviyesini analiz etmektedir. Basl (2018) şirketlerin Endüstri 4.0’a hazır olup olmadığını ölçmek ve değerlendirmek için yeni yöntemler önermektedir. Stentoft vd. (2019) bir anket araştırması yaparak artan Endüstri 4.0 hazırlık düzeyi uygulamaları için temel motivasyonları ve KOBİ’ler için başarılı bir uygulamanın önündeki engelleri araştırmaktadır.

Yukarıdaki çalışmaların tümünde tedarik zincirlerinin Endüstri 4.0 hazırlık düzeyleri ölçülmüş olmasına rağmen dijital dönüşümün olgunluk düzeyleri incelenmemiştir. Buna ek olarak, akıllı tedarik zinciri ele alınmış olmasına rağmen sürdürülebilirlik konusu ihmal edilmiştir. Bu çalışma ile literatürdeki söz konusu eksikliğin giderilmesi amaçlanmaktadır.

2.2 Endüstri 4.0 Olgunluk Modellerine Yönelik Literatür Araştırması

Dijital dönüşüm Dördüncü Sanayi Devrimini başlatan geleceğin eğilimlerini tasvir etmektedir. Dijital veri kullanımı, bağlanabilirlik, izlenebilirlik, otonom ve gerçek zamanlı karar verme yetenekleri, bir sonraki sanayi devriminin başlıca unsurlarından olan akıllı

fabrikaların temel özellikleridir. Lasi vd. (2014); Alcácer ve Cruz-Machado (2019), mevcut literatürü tarayarak Endüstri 4.0'ı mümkün kılan teknolojileri incelemişlerdir. Drath ve Horch (2014) Dördüncü Sanayi Devrimi'nin arka planını, teknik itici güçlerini ve üretimdeki geleceğini tartışmaktadır. Rüßmann vd. (2015), Endüstri 4.0'ın yapı taşları olarak kabul edilen dokuz teknolojik trendi incelemektedir. Hermann vd. (2016) Endüstri 4.0'ın temel kavramlarının açığa kavuşturulması ve Endüstri 4.0'ın uygulanması sırasında kilit teknolojilerin kullanım potansiyellerinin belirlenmesi amacıyla Endüstri 4.0'ın tasarım ilkelerini tartışmaktadır. Brunelli vd. (2017), Endüstri 4.0'ın uygulanmasında öncü olan ve operasyonlarında dijital dönüşümün faydalarını gören şirketlerden elde edilen Endüstri 4.0 uygulamalarına ilişkin yönetsel görüşler sunmaktadır.

Gökalp vd. (2017) mevcut olgunluk modelleri hakkında sistematik bir literatür incelemesi sunmuş, mevcut olgunluk modeli literatüründeki boşluğu vurgulamış ve (1) kapasite ve (2) görüş olmak üzere iki boyuttan oluşan yeni bir olgunluk modeli önermişlerdir. Akdil vd. (2018), Endüstri 4.0 dönüşüm süreci için mevcut olgunluk modellerini gözden geçirip, akıllı ürünler ve hizmetler, akıllı iş süreçleri, strateji ve organizasyon olmak üzere üç boyut içeren yeni bir olgunluk modeli önermektedir. Aguiar vd. (2019), şirketlerin mevcut dijital kapasitelerini değerlendirmelerine ve daha yüksek kapasiteye ulaşmak için bir yol haritası oluşturmalarına yardımcı olan ve (1) süreç ve (2) kapasite boyutlarını kapsayan bir olgunluk modeli geliştirmişlerdir. Veza vd. (2015) çok sayıda işletmeden veri toplamak amacıyla anketler yaparak Hırvat imalat sanayinde Endüstri 4.0'ın mevcut olgunluk düzeyini analiz etmişlerdir. Lichtblau vd. (2015), şirket temsilcileri ile atölye çalışmaları yapılarak belirlenen 6 boyut ve 18 ilişkili alt boyut içeren altı aşamalı bir Endüstri 4.0 hazırlık modeli önermektedir.

Geissbauer vd. (2016), yedi boyuttan oluşan dört aşamalı bir Endüstri 4.0 olgunluk modeli önermiştir. PwC tarafından yayınlanan model, şirketlerin Endüstri 4.0 olgunluk düzeylerini değerlendirmelerine ve öz denetim araçları ile daha iyi bir olgunluk seviyesine ulaşmaları için bir eylem planı sunmaktadır. Önerilen modelin boyutları: (1) dijital iş modelleri ve müşteri erişimi, (2) sunulan ürün ve hizmetlerin dijitalleşmesi, (3) dikey ve yatay değer zincirlerinin dijitalleşmesi ve entegrasyonu, (4) temel yetkinlik olarak veri analitiği, (5) çevik bilişim mimarisi, (6) uyumluluk, güvenlik, yasallık ve vergilendirme ve (7) organizasyon, çalışanlar ve dijital kültürdür. Rockwell Automation (2016), dört teknoloji odaklı boyuttan oluşan "Bağlantılı Kurumsal Olgunluk Modeli" adlı beş aşamalı bir olgunluk değerlendirme modeli sunmaktadır. Samaranayake vd. (2017) hazırlık düzeyini ölçen çalışmalarında altı boyut önermektedirler: (1) İnternet sisteminin geliştirilmesi, (2) teknolojide insan faktörü ve teknik bilgi, (3) aygıtların İnternete bağlanma kapasitesinin geliştirilmesi, (4) büyük veriyi yönetme becerisi, (5) örgüt içinde ve örgütler arası veri paylaşımı ile (6) veri güvenliği sisteminin geliştirilmesidir.

2.3 Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Göstergelerine Yönelik Literatür Araştırması

Literatürde sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi birçok farklı açıdan incelenmiştir ve çalışmalar çeşitli kavramlara ayrılmıştır. Temelde bu çalışmalar yeşil satın alma ve kapalı döngü içinde entegre tedarik zinciri üzerinde odaklanmaktadır. Wu ve Dunn

(1995) sürdürülebilir tedarik zincirinin, kaynaklardan tasarruf etmeyi, atıkları ortadan kaldırmayı ve verimliliği artırmayı amaçlaması bakımından tersine lojistikten farklı olduğunu belirtmektedir. Hart (1997) sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminin en az çevresel ayak izine sahip olması gerektiğini belirtmektedir. Beamon (1999) sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminin, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca; çevre tasarımı, kaynak tasarrufu, tehlikeli maddeleri azaltma, yeniden kullanma ve geri dönüşüm gibi çevresel etkilerini en aza indirmeye çalışan faaliyetleri içerecek şekilde geleneksel tedarik zincirinin genişletilmesi olduğunu ileri sürmektedir. Krikke vd. (2001) kapalı devre tedarik zincirlerinin tasarımı için çeşitli ilkeler önermektedirler. Yazarlar, tersine lojistiğin geleneksel tedarik zincirine entegrasyonunun, sürdürülebilir kalkınma ilkelerinin entegrasyonuna izin veren en uygun yapı olduğunu ileri sürmektedirler. Fleischmann ve Minner (2004) kapalı devre tedarik zincirini inceleyerek genişletilmiş tedarik zinciri kavramını ortaya atmaktadırlar. Krikke vd. (2004), sürdürülebilir tedarik zincirinin optimal yönetimi için, iadelerin amacı ile tedarik zinciri ağının şekli, ürünlerin modüler olarak yeniden kullanılması ve yeniden kullanıma ilişkin güvenilir bilgi elde edilmesi olmak üzere üç temel eylemi tanımlamaktadırlar. Wells ve Seitz (2005) yeşil tedarik zincirini, tersine lojistik faaliyetlerinin geleneksel tedarik zincirlerine entegrasyonu olarak tanımlamaktadırlar. Hervani vd.'ne (2005) göre sürdürülebilir tedarik zinciri; yeşil satın alma, yeşil üretim, yeşil dağıtım, yeşil pazarlama ve ters lojistiği içermektedir. Guide ve Van Wassenhove (2002), kapalı döngü tedarik zincirini, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca değer yaratmayı en üst düzeye çıkarmak için bir sistemin tasarımı, kontrolü ve çalışması olarak tanımlamaktadır.

2.4 Akıllı Tedarik Zinciri Yönetimine Yönelik Literatür Araştırması

Son zamanlarda birçok bilim insanı Endüstri 4.0'ın teknolojik yönlerine ve tedarik zinciri yönetimindeki etkilerine odaklanmaktadır (Hermann vd., 2016; Tjahjono vd., 2017; Barreto vd., 2017; Vaidya vd., 2018). Butner (2010), akıllı tedarik zincirlerinin maliyet kontrolünü ve tedarik zinciri görünürlüğünü sağlayarak riskle etkili bir şekilde başa çıkabileceğini ve iş hedeflerini karşılayabileceğini öne sürmektedir. Valkokari vd. (2011) akıllı tedarik zincirlerinin, yalnızca müşteri, üretici, tedarikçi ve inovasyon ortağı gibi akıllı TZY'nin dört ana aktörünün stratejik niyetlerini ve süreçteki rollerini anlayarak elde edilebileceğini öne sürmektedir. Zelbst vd. (2012) radyo frekansı tanımlama teknolojisinin üretim verimliliğini ve etkinliğini arttırdığını bulmuştur. Masciari (2012) radyo frekansı tanımlama teknolojisinin tedarik zincirine görünürlük sağladığı görüşünü incelemektedir. Lichtblau vd. (2015)'ne göre şirketlerin sadece %16,8'i, Endüstri 4.0 performanslarını değerlendirmek için bir sisteme sahiptir, ne var ki bunların yarısından azı göstergelerinin yeterli olduğunu düşünmektedir.

Faller ve Feldmüller (2015) teknolojik yönlerin esas olarak akıllı fabrika kavramını, yani üretim sisteminde akıllı ve dinamik öğrenme ortamının yaratılması ile ilgilendiğini ileri sürmektedir. Seitz ve Nyhuis (2015) siber-fiziksel sistemlerin üretim planlama, kontrol ve izleme açısından avantajlarını araştırmaktadır. Bu bağlamda yazarlar, siber-fiziksel üretim sistemlerinin uygulanması yoluyla lojistik model performansının yükseltilmesi ve olası lojistik maliyetlerin azaltılması ile ilgilenmektedir. Wu vd. (2016), akıllı tedarik

zincirlerinin maliyet azaltma ve verimlilik iyileştirme için sunduğu benzersiz fırsatları incelemektedir. Yuvaraj ve Sangeetha (2016), üretim süreçlerinin düşük güçlü kablosuz iletişim sistemleri kullanan akıllı tedarik zincirleri ile hem iç hem de dış ortamlarda izlenebileceğini ifade etmektedir. Strandhagen vd.'ne (2016) göre üretim ortamının, Endüstri 4.0'ın üretim lojistiğine bağlı kilit unsurlarının uygulanabilirliği üzerinde önemli bir etkisi vardır. Prinz vd. (2016)'e göre gerçek ve sanal iş dünyası, büyük veriler kullanılarak üretim açısından daha hızlı, daha verimli ve daha esnek olmak üzere Nesnelerin İnternetine dönüşmektedir. Sanders vd. (2016) akıllı üretimin, dijital olarak birbirine bağlı bir tedarik zinciri oluşturmak için en modern bilişim teknolojileriyle ilişkili olduğunu ileri sürmektedir. Bu aynı zamanda ürünler, makineler, ekosistem ve hatta tüketiciler arasında ve ürün yaşam döngüsünün her aşamasında bir ara bağlantı anlamına gelmektedir. Böylece tedarik zincirleri gittikçe karmaşıklaşmakta ve anlaşılması güçleşmektedir. Özlü (2017), bir Endüstri 4.0 modelinin benimsenmesinin, işgücü verimliliğinin, üretiminin ve ülkenin rekabet avantajının artmasına katkıda bulunabileceğini önermektedir. Schlüter ve Henke (2017), tedarik zincirleri boyunca verilerin proaktif bir şekilde yönetilmesiyle risklerin daha erken bir aşamada önlenilebileceğini veya azaltılabileceğini ortaya koymaktadır. Yazarlar ayrıca, Nesnelerin İnternetinin geleneksel TZY'nin tüm zorlukların üstesinden gelmek için veri, bilgi, ürünler, fiziksel nesneler ve tedarik zincirinin tüm süreçlerini birleştirmek için büyük bir akıllı altyapı oluşturulmasına yardımcı olduğu sonucuna varmıştır.

2.5 Literatür Boşluğu

Son yıllarda iyice hızlanan küreselleşme, piyasa rekabetindeki artış, hızla azalan doğal kaynaklar, hızlı ve sürekli demografik değişimler, yasal düzenlemeler ve iklim değişikliği sonucunda, şirketler sürdürülebilir iş modellerine geçiş yapmaya zorlanmıştır. Bunun yanında dijital dönüşüm sonucunda birçok şirket yeni ortaya çıkan akıllı teknolojilere ve uygulamalara büyük bir hızla uyum sağlamaktadırlar. Tüm bunlar göz önüne alındığında şirketlerin rekabet güçlerini korumaları ve değişen şartlara uyum yeteneklerini arttırabilmeleri için dijital dönüşüm süreçleri boyunca akıllı sistemlere geçiş ve sürdürülebilirlik stratejilerinde yeterli bir olgunluk seviyesine ulaşabilmeleri gerekmektedir. Bu sürdürülebilirlik ve dijital dönüşüm seviyelerinin belirlenebilmesi etkin bir hazırlık ve olgunluk modeli kullanılması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

Literatürde şimdiye kadar hiçbir hazırlık ve olgunluk modeli sürdürülebilirlik ve Endüstri 4.0 araçlarını aynı anda kapsamamaktadır. Önerilen model, firmaların dijital tedarik zincirlerinin hazırlık ve olgunluk seviyelerini, akıllılık ve sürdürülebilirlik boyutlarını aynı anda ele alarak ölçmelerine olanak tanıyan ve geometrik ortalamaya dayanan bir değerlendirme aracı sunarak literatürdeki bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

3. Model Önerisi

Çalışmanın bu kısmında önceki bölümlerde sunulan literatür taraması temel alınarak yeni bir akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri hazırlık ve olgunluk (ASTZHO) yaklaşımı tanıtılacaktır. Önerilen modelde temel olarak Endüstri 4.0 araçlarının sürdürülebilirliğinin üç temel boyutu olan ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarda tedarik zinciri

yönetimi bağlamında ne derece anlaşıldığı (anlaşılma skoru), ne derece uygulandığı (uygulanma skoru) ve organizasyonel amaçlara ne derece katkı sağladığı (gelişim skoru) kavramsallaştırılmaktadır. Böylece akıllı teknolojilerin tedarik zincirine adaptasyonunda sürekli gelişim ve yenilik faaliyetlerini desteklemek amacıyla mevcut durumu bir hazırlık ve olgunluk yaklaşımı ile değerlendirmek, performans ölçmek ve hedefler belirlemek mümkün olabilmektedir.

ASTZHO modelinin bileşenlerini on iki adet Endüstri 4.0 aracı ile sürdürülebilirliğin 3 ana boyutu (ekonomik, çevresel ve sosyal) oluşturmaktadır. Modelde sürdürülebilirliğin üç boyutu göstergeler ile temsil edilmektedir.

Ekonomik sürdürülebilirlik boyutu; maliyet, stok devir hızı, tedarik süresi, hasar ve kayıp oranları ile kârlılık gibi parametreler çerçevesinde değerlendirilmektedir.

Çevresel sürdürülebilirlik boyutu; emisyon, enerji tüketimi, kaynak kullanımı, atık ile kirlilik gibi parametreler çerçevesinde değerlendirilmektedir.

Sosyal sürdürülebilirlik boyutu; ise kariyer gelişimi, iş güvenliği ve sağlığı, iş güvencesi, ikramiye, prim ve yan yardımlar, işgücü istismarı, iş yerinde taciz ve psikolojik şiddet, kamu yararı ile sosyal sorumluluk gibi parametreler çerçevesinde değerlendirilmektedir.

Her bir boyutun hazırlık ve olgunluk puanı; göstergelerin ortalamaları alınarak hesaplanmaktadır. Modelin matematiksel gösterimi ve ana adımları şu şekildedir:

Adım 1. Modelin ilk adımında on iki aracın her biri için üç sürdürülebilirlik boyutunda anlaşılma, uygulanma ve gelişime katkı puanları katılımcılardan 5’li Likert ölçeği ile elde edilmektedir. Ölçekte 1 çok düşük, 2 düşük, 3 orta, 4 yüksek, 5 çok yüksek anlaşılma, uygulama veya gelişim skorunu ifade etmektedir. Böylece on iki Endüstri 4.0 aracının satırları sürdürülebilirliğin 3 ana boyutunda anlaşılma, uygulanma ve gelişim skorlarının sütunları oluşturduğu 12x9’luk araç olgunluk birincil matrisi elde edilmektedir.

Adım 2. İkinci adımda araç olgunluk birincil matrisindeki değerleri kullanarak on iki Endüstri 4.0 aracının her biri için üç sürdürülebilirlik boyutunda araç boyut skoru Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır. Araç boyut skoru (S_{ij}) Endüstri 4.0 aracı i ’nin sürdürülebilirlik boyutu j ’deki anlaşılma (A_{ij}), uygulanma (U_{ij}) ve gelişim (G_{ij}) skorlarının geometrik ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.

$$S_{ij} = \sqrt[3]{A_{ij} \times U_{ij} \times G_{ij}} \quad (1)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, 12$ (Endüstri 4.0 araç sayısı)

$j = 1, 2, 3$ (Sürdürülebilirlik boyutu)

S_{ij} : Endüstri 4.0 aracı i ’nin sürdürülebilirlik boyutu j ’deki araç boyut skoru

A_{ij} : Endüstri 4.0 aracı i ’nin sürdürülebilirlik boyutu j ’deki anlaşılma (A) hazırlık ve olgunluk skoru

U_{ij} : Endüstri 4.0 aracı i ’nin sürdürülebilirlik boyutu j ’deki uygulanma (U) hazırlık ve olgunluk skoru

G_{ij} : Endüstri 4.0 aracı i 'nin sürdürülebilirlik boyutu j 'deki gelişime katkı (G) hazırlık ve olgunluk skoru

Adım 3. Üçüncü aşamada, her sürdürülebilirlik boyutu için bir toplam hazırlık ve olgunluk skoru Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmaktadır. Endüstri 4.0 aracı i 'nin araç sürdürülebilirlik hazırlık ve olgunluk skoru (P_i) araç boyut skorlarının (S_{ij}) aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.

$$P_i = \frac{1}{3} \left(\sum S_{ij} \right) \quad (2)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, 12$ (Endüstri 4.0 araç sayısı)

$j = 1, 2, 3$ (Sürdürülebilirlik boyutu)

P_i : Endüstri 4.0 aracı i 'nin araç sürdürülebilirlik hazırlık ve olgunluk skoru

Adım 4. Dördüncü aşamada, işletme için her bir sürdürülebilirlik boyutunda j 'deki akıllı ve sürdürülebilir hazırlık ve olgunluk skoruna Eşitlik 3 yoluyla ulaşılmaktadır. Tedarik zincirinin sürdürülebilirlik boyutu j 'deki akıllı ve sürdürülebilir hazırlık ve olgunluk skoru (T_j) on iki Endüstri 4.0 aracının araç boyut skorlarının (S_{ij}) aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.

$$T_j = \frac{1}{12} \left(\sum S_{ij} \right) \quad (3)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, 12$ (Endüstri 4.0 araç sayısı)

$j = 1, 2, 3$ (Sürdürülebilirlik boyutu)

T_j : Tedarik zincirinin sürdürülebilirlik boyutu j 'deki akıllı ve sürdürülebilir hazırlık ve olgunluk skoru

Adım 5. Son olarak beşinci aşamada, işletme için toplam bir akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri hazırlık ve olgunluk (ASTZHO) skoru Eşitlik 4 yoluyla hesaplanmaktadır. Akıllı ve sürdürülebilirlik tedarik zinciri hazırlık ve olgunluk skoru (Z) tedarik zincirinin üç sürdürülebilirlik boyutundaki akıllı ve sürdürülebilir hazırlık ve olgunluk skorlarının (T_j) aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.

$$Z = \frac{1}{3} \left(\sum T_j \right) \quad (4)$$

$j = 1, 2, 3$ (Sürdürülebilirlik boyutu)

Z : Tedarik zincirinin akıllı ve sürdürülebilirlik hazırlık ve olgunluk skoru

4. Nümerik Örnek

Çalışmanın bu kısmında önerilen modelin uygulanabilirliği test etmek için yapılan örnek olay çalışmasının detayları ve sonuçları yer almaktadır. Örnek çalışma otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firma bünyesinde yapılmıştır. 1969 yılında kurulan ABC şirketi, Türkiye'nin önde gelen otomobil parçaları tedarikçilerinden biridir. İşletmenin gizlilik politikası nedeniyle çalışmanın örnek olay uygulamasında şirket adı gizlenerek ABC olarak yeniden adlandırılmış ve anket yoluyla elde edilen veriler değiştirilmiştir. ABC, yolcu, ticari ve ağır ticari araçlar için süspansiyon, şase, şanzıman, debriyaj, egzoz,

yakıt, soğutma ve fren sistemleri gibi çeşitli ürünler üretmektedir. Şirketin ana makine ve prosesleri sac ve metal kalıp, alüminyum ve plastik enjeksiyon kalıp, yüksek ve alçak basınçlı döküm, pres baskı ve ileri teknoloji talaşlı imalat üretim hatlarında CAD, CAM, CAE, CAPP yöntemlerinin yanı sıra simülasyon, eklemeli imalat, robotik ve otonom sistemler gibi akıllı teknolojiler kullanılmaktadır. Şirketin Ar&Ge Tasarım ve Mühendislik departmanının yöneticileri ile Endüstri 4.0 araçlarının hazırlık ve olgunluk düzeylerini temsil eden anket çalışması yapılmıştır. Elde edilen verinin 3. Bölümde önerilen model ile analiziyle ulaşılan sonuçlar aşağıda gösterilmektedir.

Örnek olay analizinin ilk adımında her bir Endüstri 4.0 aracı için sürdürülebilirliğin üç boyutunda anlaşılma (A), uygulanma (U) ve gelişim (G) skorlarını temsil eden araç olgunluk birincil matrisi elde edilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Araç olgunluk birincil matrisi

Endüstri 4.0 Aracı (i)	Ekonomik (j=1)			Çevresel (j=2)			Sosyal (j=3)		
	A _{ij}	U _{ij}	G _{ij}	A _{ij}	U _{ij}	G _{ij}	A _{ij}	U _{ij}	G _{ij}
Robotik ve Otonom Sis.	5	4	4	4	4	4	4	4	4
Eklemeli İmalat	5	4	3	4	2	2	4	3	2
Artırılmış Gerçeklik	4	4	4	3	3	3	3	2	2
Simülasyon	5	5	5	4	4	4	4	4	4
Yatay ve Dikey Sistem Entegrasyonu	5	4	4	5	4	4	4	4	4
Nesnelerin İnterneti	5	4	4	5	4	4	4	3	3
Bulut Bilişim	5	5	4	4	4	4	4	3	3
Siber Güvenlik	5	4	4	3	2	3	5	5	4
Büyük Veri Analitiği	4	3	2	3	2	2	3	2	2
Yapay Zeka	4	2	2	3	3	3	3	3	3
Makine Öğrenmesi	4	3	2	3	3	2	2	2	2
Blok Zincir Teknolojisi	4	2	2	3	3	2	3	2	2

İkinci aşamada on iki Endüstri 4.0 aracının her biri için üç sürdürülebilirlik boyutunda araç boyut hazırlık ve olgunluk skorları ile toplam araç hazırlık ve olgunluk skorları hesaplanmaktadır (Tablo 2).

Tablo 2. Araç hazırlık ve olgunluk skorları

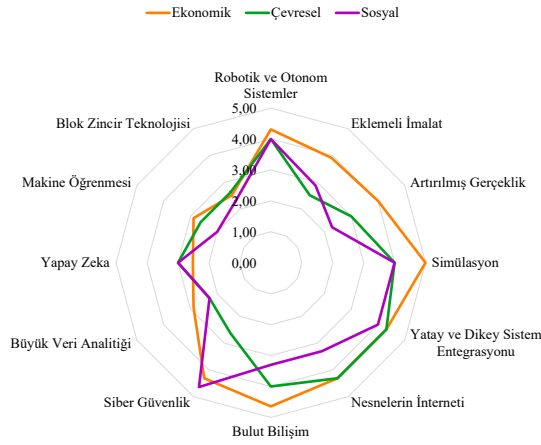
Endüstri 4.0 Aracı (i)	Ekonomik (S _{i1})	Çevresel (S _{i2})	Sosyal (S _{i3})	Araç Skoru (P _i)
Robotik ve Otonom Sis.	4,309	4,000	4,000	4,103
Eklemeli İmalat	3,915	2,520	2,884	3,106
Artırılmış Gerçeklik	4,000	3,000	2,289	3,096
Simülasyon	5,000	4,000	4,000	4,333
Yatay ve Dikey Sistem Entegrasyonu	4,309	4,309	4,000	4,206
Nesnelerin İnterneti	4,309	4,309	3,302	3,973
Bulut Bilişim	4,642	4,000	3,302	3,981
Siber Güvenlik	4,309	2,621	4,642	3,857
Büyük Veri Analitiği	2,884	2,289	2,289	2,488
Yapay Zeka	2,520	3,000	3,000	2,840
Makine Öğrenmesi	2,884	2,621	2,000	2,502
Blok Zincir Teknolojisi	2,520	2,621	2,289	2,477

Son aşamada işletmenin her bir sürdürülebilirlik boyutundaki akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri hazırlık ve olgunluk skoru hesaplanmaktadır (Tablo 3).

Tablo 3. Akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri hazırlık ve olgunluk skorları

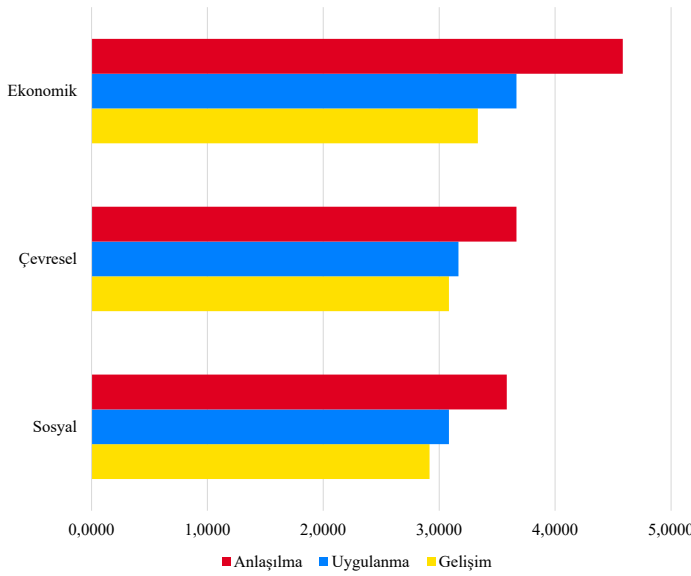
Sürdürülebilirlik Boyutu (j)	Anlaşılma Düzeyi (A_j)	Uygulanma Düzeyi (U_j)	Gelişime Katkı Düzeyi (G_j)	Hazırlık ve Olgunluk Skoru (T_j)
Ekonomik	4,583	3,667	3,333	3,800
Çevresel	3,667	3,167	3,083	3,274
Sosyal	3,583	3,083	2,917	3,167
ASTZHO (Z)	3,414			

Bu çalışmada önerilen model, yönetici ve karar vericilere Endüstri 4.0'a hazırlık ve uyum sonrası olgunluk düzeylerinin niceliksel ölçümü ve değerlendirilmesi için taktiksel iç görü sağlarken, uzun dönemde stratejik kararlar almalarına yardım etmektedir.



Şekil 2. Akıllı teknolojilerin sürdürülebilirlik boyutları ile ilişkisi

Şekil 2’de gösterilen ve nümerik örnekten elde ettiğimiz radar diyagramı, ABC şirketinin ekonomik, çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik skorlarını göstermektedir. Bu skorlar üzerinden yöneticiler Endüstri 4.0 araçlarının sürdürülebilirliğin üç temel boyutu olan ekonomik, çevresel ve sosyal boyutların tedarik zinciri yönetimi bağlamında ne derece anlaşıldığını, uygulandığını ve gelişime katkı sağladığını görebilmektedirler. Örneğin, simülasyon sürdürülebilirliğin ekonomik boyutuna göre, yüksek bir olgunluk skoru alırken, çevresel ve sosyal boyutlara göre daha düşük skor almıştır. Siber güvenlik, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik boyutlarında yüksek hazırlık ve olgunluk skoru alırken, çevresel sürdürülebilirlik boyutunda yetersiz kalmaktadır. ABC şirketi, büyük veri analitiği, yapay zeka, makine öğrenmesi ve blok zincir teknolojisi alanlarında sürdürülebilirliğin üç boyutunda düşük skor alırken, diğer akıllı teknolojilerde görece daha olgundur.

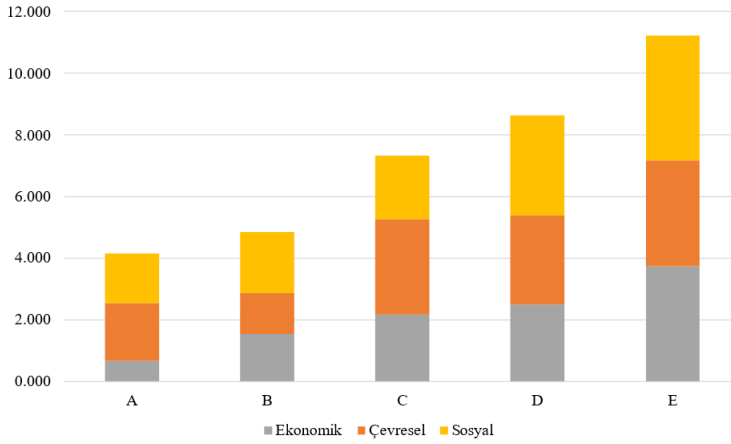


Şekil 3. ASTZHO modelinin parametrelerinin sürdürülebilirlik boyutları ile ilişkisi

Şekil 3'te verilen çubuk diyagramında, akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri hazırlık ve olgunluk (ASTZHO) modelinin üç değişkeni olan anlaşılma, uygulanma ve gelişim skorlarının sürdürülebilirliğin ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarında aldıkları skorlar gösterilmektedir. Grafiğe göre, modelin akıllı teknolojilerin anlaşılma parametresi her üç sürdürülebilirlik boyutunda uygulanma ve gelişim parametrelerine göre daha yüksektir. Uygulanma parametresi ise gelişime göre daha yüksek skor almıştır.

5. Senaryo Analizi

Çalışmanın bu bölümünde önerilen modelin akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri hazırlık ve olgunluk düzeyini doğru ve geçerli bir şekilde ölçtüğünü analiz etmek için, söz konusu modelin boyutlarında farklı anlaşılma, uygulanma ve gelişim seviyelerine dayalı potansiyel senaryolar test edilmektedir. A senaryosuna göre Endüstri 4.0 uygulamaları bakımından temel seviyedeki bir firma, B senaryosuna göre başlangıç seviyesindeki bir firma, C senaryosuna göre orta seviyedeki bir firma, D senaryosuna göre üst-orta seviyedeki bir firma ve E senaryosuna göre ileri seviyedeki bir firmanın akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri hazırlık ve olgunluk skorları modellenmektedir. Bu testlerin sonuçları Şekil 4'te gösterilmektedir. Senaryo analizine göre farklı seviyelerde ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik skorları üst seviyelere geçildikçe artış göstermekte iken çevresel sürdürülebilirlik skorları dalgalı bir değişim göstermektedir. Boyutların ortalaması olan akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri hazırlık ve olgunluk skoru ise her seviyede artmaktadır. Çevresel sürdürülebilirliğin dalgalanmasının muhtemel sebeplerinden biri emisyon, enerji tüketimi, kaynak kullanımı, atık ile kirlilik gibi parametrelerin firmanın teknoloji yoğun üretiminden görece bağımsız olarak sektör, büyüklük, yönetimsel yaklaşım veya kültür gibi bir takım örgütsel niteliklerine dayanması olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 4. Senaryo analizi sonuçları

6. Yönetimsel Etkiler

Bu çalışma, yöneticilere bir tedarik zincirinin akıllı ve sürdürülebilir boyutlar açısından hazırlık ve olgunluk seviyesini eşzamanlı olarak değerlendirmelerine yardımcı olan bir değerlendirme aracı sunmaktadır. Önerilen model, Endüstri 4.0 araçlarını sürdürülebilirliğin üç temel boyutu olan ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarda inceleyerek bu boyutların anlaşılma derecesini, uygulanma derecesini ve organizasyonel amaçlara katkı derecesini içeren bir olgunluk skoru üretmektedir. Modelin sonucu olarak ortaya çıkan akıllı ve sürdürülebilir hazırlık ve olgunluk skoru, yöneticilerin akıllı ve sürdürülebilir tedarik zincirlerinin mevcut ve hedeflenen performans seviyelerini karşılaştırmasına olanak tanırken, bu akıllı teknolojilerin tedarik zincirine adaptasyonunda sürekli gelişim ve yenilik faaliyetlerini desteklemek amacıyla mevcut durumu değerlendirip, performans ölçer ve gelecek hedefleri belirlemeye yardımcı olur. Örneğin, Tablo 3'te sürdürülebilirliğin ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarında hazırlık ve olgunluk skorları anlaşılma, uygulanma ve gelişime katkı düzeylerinde verilmektedir. Bu analize göre, ekonomik, çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik hazırlık ve olgunluk skorları sırası ile 3,800, 3,274 ve 3,167 olarak hesaplanmış ve modelin nihai sonucu olan akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri hazırlık ve olgunluk skoru ise 3,414 olarak hesaplanmıştır. Bu skorlar yöneticiler için firmanın Endüstri 4.0'a hazırlık ve uyum düzeyinin 5 üzerinden 3,414 aldığını belirterek, firmanın eksik ve gelişime açık yönleri hakkında bilgi vermektedir. Şekil 2'de verilen ve firmanın sahip olduğu akıllı teknolojilerin sürdürülebilirlik boyutları ile ilişkisini gösteren grafiğe göre, firmanın zayıf olduğu alanlar blok zincir teknolojisi, makine öğrenmesi, yapay zeka ve büyük veri analitiğidir. Bu alanlardaki eksiklikler akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri hazırlık ve olgunluk skorunu düşürürken, firmanın gelişime açıktır yetkinlikleridir.

7. Sonuçlar

Endüstri 4.0, firmaların tedarik zinciri süreçlerinde paradigma kaymasına yol açarken, akıllı teknolojilerin bu süreçlere entegrasyonu ile daha iyi takip kolaylığı, kontrol ve veri görünürlüğü sağlanmaktadır. Bu sayede şirketler üretmiş oldukları ürünleri ve hizmetleri piyasaya daha hızlı, düşük maliyetli ve yüksek kaliteli olarak sunma fırsatı yakalamaktadırlar. Bununla beraber sürdürülebilir tedarik zinciri kavramının ortaya

çıkması, firmaları tedarik zinciri faaliyetlerini ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlar altında sürdürmeye teşvik etmiştir. Bu çalışmada firmaların Endüstri 4.0'a hazırlık ve olgunluk düzeylerinin daha iyi anlaşılabilirliği için, dijital tedarik zincirlerinin akıllı ve sürdürülebilir boyutta olgunluk düzeylerinin eş zamanlı ölçülebilmesine olanak sağlayan bir model önerilmiştir. Bu model akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri hazırlık ve olgunluk (ASTZHO) modeli olarak isimlendirilmiş ve modelin bileşenleri on iki adet Endüstri 4.0 aracı ile sürdürülebilirliğin 3 ana boyutundan (ekonomik, çevresel ve sosyal) oluşturulmuştur. Önerilen model, Endüstri 4.0 araçlarının sürdürülebilirliğin temelinde yatan ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarda tedarik zinciri yönetimi içinde anlaşılma, uygulanma ve organizasyonel amaçlara katkı derecelerini değerlendirerek, en son aşamada bir akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri hazırlık ve olgunluk (ASTZHO) skoru sunmaktadır. Bu skor firmaların Endüstri 4.0'a hazırlık ve uyum sonrası olgunluk düzeylerinin niceliksel ölçümü ve değerlendirilmesi için şirket yöneticilerine Endüstri 4.0 performansına daha iyi odaklanabilme ve gelecek için bir yol haritası belirleyebilme imkanı sağlayacaktır. Endüstri 4.0 olgunluk düzeyinin sektörden sektöre farklı yaklaşımları gerektirmesi nedeniyle (Elibal ve Özceylan, 2011, 2022) sektörel farklılıklara yönelik çalışmalar ileride yapılacak çalışmaların odağını oluşturabilecektir. Bunun yanında, akıllı teknolojilerin tedarik zincirine adaptasyonunda sürekli gelişim ve yenilik faaliyetlerini desteklemek için mevcut durumun bir hazırlık ve olgunluk modeli ile değerlendirilmesi, performans ölçümü ve hedef belirleme konusunda karar vericilere yol gösterecektir.

Bilgilendirilmiş Onam: Katılımcılardan bilgilendirilmiş onam alınmıştır.

Hakem Değerlendirmesi: Dış bağımsız.

Yazar Katkıları: Yazar Katkıları: Çalışma Konsepti/Tasarım- S.D., M.A.G., T.P.; Veri Toplama- S.D., M.A.G., T.P.; Veri Analizi/Yorumlama- S.D., M.A.G., T.P.; Yazı Taslağı- S.D., M.A.G., T.P.; İçeriğin Eleştirel İncelemesi- S.D., M.A.G., T.P.; Son Onay ve Sorumluluk- S.D., M.A.G., T.P.

Çıkar Çatışması: Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemişlerdir.

Finansal Destek: Yazarlar finansal destek beyan etmemişlerdir.

Informed Consent: Written consent was obtained from the participants.

Peer Review: Externally peer-reviewed.

Author Contributions: Author Contributions: Conception/Design of Study- S.D., M.A.G., T.P.; Data Acquisition- S.D., M.A.G., T.P.; Data Analysis/Interpretation- S.D., M.A.G., T.P.; Drafting Manuscript- S.D., M.A.G., T.P.; Critical Revision of Manuscript- S.D., M.A.G., T.P.; Final Approval and Accountability- S.D., M.A.G., T.P.

Conflict of Interest: Authors declared no conflict of interest.

Financial Disclosure: Authors declared no financial support.

Kaynakça

- Aguiar, T., Gomes, S. B., da Cunha, P. R., & da Silva, M. M. (2019, October). Digital transformation capability maturity model framework. In 2019 IEEE 23rd International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC) (pp. 51-57). IEEE.
- Ahi, P., & Searcy, C. (2013). A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. *Journal of cleaner production*, 52, 329-341.
- Akdil, K. Y., Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). Maturity and readiness model for industry 4.0 strategy. In *Industry 4.0: Managing the digital transformation* (pp. 61-94). Springer, Cham.

- Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(3), 899-919.
- Barreto, L., Amaral, A., & Pereira, T. (2017). Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing*, 13, 1245-1252.
- Basl, J. (2017). Pilot study of readiness of Czech companies to implement the principles of Industry 4.0. *Management and Production Engineering Review*, 8(2), 3-8.
- Basl, J. (2018, September). Analysis of industry 4.0 readiness indexes and maturity models and proposal of the dimension for enterprise information systems. In *International Conference on Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems* (pp. 57-68). Springer, Cham.
- Basl, J., & Doucek, P. (2019). A metamodel for evaluating enterprise readiness in the context of Industry 4.0. *Information*, 10(3), 89.
- Basl, J., & Kopp, J. (2017). Study of the Readiness of Czech Companies to the Industry 4.0. *Journal of Systems Integration*, 8(3), 40-45.
- Beamon, B. M. (1999). Designing the green supply chain. *Logistics information management*.
- Bechtold, J., & Lauenstein, C. (2014). Digitizing Manufacturing: Ready Set Go. Capgemini. https://www.capgemini.com/consulting-de/wp-content/uploads/sites/32/2017/08/digitizing-manufacturing_0.pdf.
- Botha, A. P. (2018). Rapidly arriving futures: Future readiness for Industry 4.0. *South African Journal of Industrial Engineering*, 29(3), 148-160.
- Brunelli, J., Lukic, V., Milon, T., & Tantardini, M. (2017). Five lessons from the Frontlines of Industry 4.0. The Boston Consulting Group.
- Butner, K. (2010). The smarter supply chain of the future. *Strategy & Leadership*.
- Candanedo, I. S., Nieves, E. H., González, S. R., Martín, M. T. S., & Briones, A. G. (2018, August). Machine learning predictive model for industry 4.0. In *International Conference on Knowledge Management in Organizations* (pp. 501-510). Springer, Cham.
- Carlozo, L. (2017). What is blockchain?. *Journal of Accountancy*, 224(1), 29.
- Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.
- De Carolis, A., Macchi, M., Negri, E., & Terzi, S. (2017a, June). Guiding manufacturing companies towards digitalization a methodology for supporting manufacturing companies in defining their digitalization roadmap. In *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* (pp. 487-495). IEEE.
- De Carolis, A., Macchi, M., Negri, E., & Terzi, S. (2017b, September). A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies. In *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems* (pp. 13-20). Springer, Cham.
- Drath, R., & Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or Hype? [Industry Forum]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 56-58.
- El Kadiri, S., Grabot, B., Thoben, K. D., Hribernik, K., Emmanouilidis, C., Von Cieminski, G., & Kiritsis, D. (2016). Current trends on ICT technologies for enterprise information systems. *Computers in Industry*, 79, 14-33.
- Elibal, K., & Özceylan, E. (2021). A systematic literature review for industry 4.0 maturity modeling: state-of-the-art and future challenges. *Kybernetes*, 50(11), 2957-2994.
- Elibal, K., & Özceylan, E. (2022). Comparing industry 4.0 maturity models in the perspective of TQM principles using Fuzzy MCDM methods. *Technological Forecasting and Social Change*, 175, 121379.
- Ernst, F., & Frische, P. (2015). Industry 4.0/industrial internet of things-related technologies and requirements for a successful digital transformation: An investigation of manufacturing businesses worldwide. Available at SSRN 2698137.
- Faller, C., & Feldmüller, D. (2015). Industry 4.0 learning factory for regional SMEs. *Procedia Cirp*, 32, 88-91.

- Fleischmann, M., & Minner, S. (2004). Inventory management in closed loop supply chains. In *Supply chain management and reverse logistics* (pp. 115-138). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gausemeier, J., Schmidt, M., Anderl, R., Schmid, H. J., Leyens, C., Seliger, G., Winzer, P., Kohlhuber, M., Kage, M., & Karg, M. (2017). *Additive Manufacturing*.
- Geissbauer, R., Vedso, J., & Schrauf, S. (2016). *Industry 4.0: Building the digital enterprise*. Retrieved from PwC Website: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016>. Pdf.
- Gökalp, E., Şener, U., & Eren, P. E. (2017, October). Development of an assessment model for industry 4.0: industry 4.0-MM. In *International Conference on Software Process Improvement and Capability Determination* (pp. 128-142). Springer, Cham.
- Guide, V. D. R. Jr, & Van Wassenhove, L. N. (2002). Closed-loop supply chains. In A. Klose, M. Grazia Speranza, L.N. Van Wassenhove (éd.), *Quantitative Approaches to Distribution Logistics and Supply Chain Management* (pp. 47-60). Berlin: Springer
- Hart, S. L. (1997). Beyond greening: Strategies for a sustainable world. *Harvard Business Review*, 75(1), 66-77.
- Hayes, B. (2008). Cloud computing. *Communications of the ACM*, 51(7), 9-11.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016, January). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)* (pp. 3928-3937). IEEE.
- Hervani, A. A., Helms, M. M., & Sarkis, J. (2005). Performance measurement for green supply chain management. *Benchmarking: An international journal*.
- Kenton, W. (2018). *Augmented reality. Investopedia Fundamental Analysis: Sectors & Industries Analysis*. Retrieved from Web Site: <https://www.investopedia.com/terms/a/augmented-reality.asp>.
- Kim, T., Glock, C. H., & Kwon, Y. (2014). A closed-loop supply chain for deteriorating products under stochastic container return times. *Omega*, 43, 30-40.
- Kohlegger, M., Maier, R., & Thalmann, S. (2009). Understanding maturity models: Results of a structured content analysis (pp. 51-61).
- Krikke, H., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & Van Wassenhove, L. N. (2001). Design of closed loop supply chains: a production and return network for refrigerators. Rotterdam: Erasmus Research Institute of Management (ERIM).
- Krikke, H., Blanc, I. L., & van de Velde, S. (2004). Product modularity and the design of closed-loop supply chains. *California management review*, 46(2), 23-39.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6(4), 239-242.
- Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 18, 20-23.
- Lee, E. A. (2008, May). Cyber physical systems: Design challenges. In *2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)* (pp. 363-369). IEEE.
- Lezzi, M., Lazoi, M., & Corallo, A. (2018). Cybersecurity for Industry 4.0 in the current literature: A reference framework. *Computers in Industry*, 103, 97-110.
- Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., ... & Schröter, M. (2015). *IMPULS-industrie 4.0-readiness*. Impuls-Stiftung des VDMA, Aachen-Köln.
- Lin, T. C., Wang, K. J., & Sheng, M. L. (2020). To assess smart manufacturing readiness by maturity model: a case study on Taiwan enterprises. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(1), 102-115.
- Lucato, W. C., Pacchini, A. P. T., Facchini, F., & Mummolo, G. (2019). Model to evaluate the Industry 4.0 readiness degree in Industrial Companies. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1808-1813.

- Machado, C. G., Winroth, M., Carlsson, D., Almström, P., Centerholt, V., & Hallin, M. (2019). Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enablers towards increased digitalization. *way*, 1(2), 3-4.
- Masciari, E. (2012). SMART: Stream monitoring enterprise activities by RFID tags. *Information Sciences*, 195, 25-44.
- Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia Cirp*, 17, 9-13.
- Özlu, F. (2017). The advent of Turkey's industry 4.0. *Turkish Policy Quarterly*, 16(2), 29-38.
- Prinz, C., Morlock, F., Freith, S., Kreggenfeld, N., Kreimeier, D., & Kuhlenkötter, B. (2016). Learning factory modules for smart factories in industrie 4.0. *Procedia CiRp*, 54, 113-118.
- Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, 6, 3585-3593.
- Rajnai, Z., & Kocsis, I. (2018, February). Assessing industry 4.0 readiness of enterprises. In 2018 IEEE 16th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI) (pp. 000225-000230). IEEE.
- Rockwell Automation. (2016). The Connected Enterprise Maturity Model. Retrieved from Website: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/ciewp002_-en-p.pdf
- Roland Berger (2014) Think act: Coö insights – Industry 4.0. Available at: <https://www.rolandberger.com/de/Publications/COO-Insights-Industry-4.0.html> (Accessed: 14 February 2020).
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston Consulting Group*, 9(1), 54-89.
- Samaranayake, P., Ramanathan, K., & Laosirihongthong, T. (2017, December). Implementing industry 4.0—A technological readiness perspective. In 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (pp. 529-533). IEEE.
- Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. P. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9(3), 811-833.
- Santos, R. C., & Martinho, J. L. (2019). An Industry 4.0 maturity model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- Seitz, K. F., & Nyhuis, P. (2015). Cyber-physical production systems combined with logistic models-a learning factory concept for an improved production planning and control. *Procedia CIRP* 32 (2015), 32, 92-97.
- Sisco, C., Chorn, B., & Pruzan-Jorgensen, P. M. (2011). *Supply chain sustainability: A practical guide for continuous improvement*. United Nations Global Compact.
- Schlüter, F., & Henke, M. (2017). Smart supply chain risk management-a conceptual framework. In *Digitalization in Supply Chain Management and Logistics: Smart and Digital Solutions for an Industry 4.0 Environment*. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), Vol. 23 (pp. 361-380). Berlin: epubli GmbH.
- Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of cleaner production*, 16(15), 1699-1710.
- Stentoft, J., Jensen, K. W., Philipsen, K., & Haug, A. (2019, January). Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: A SME perspective with empirical evidence. In *Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences*.
- Strandhagen, J. W., Alfnes, E., Strandhagen, J. O., & Swahn, N. (2016, November). Importance of production environments when applying Industry 4.0 to production Logistics-A multiple case study. In *6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*. Atlantis Press.
- Tao, F., Zhang, M., Cheng, J., & Qi, Q. (2017). Digital twin workshop: A new paradigm for future workshop. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 23(1), 1-9.
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). What does industry 4.0 mean to supply chain?. *Procedia Manufacturing*, 13, 1175-1182.

- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0—a glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233-238.
- Valkokari, K., Kansola, M., & Valjakka, T. (2011). Towards collaborative smart supply chains—capabilities for business development. *International Journal of Enterprise Network Management*, 4(4), 380-399.
- Veza, I., Mladineo, M., & Peko, I. (2015, January). Analysis of the current state of Croatian manufacturing industry with regard to Industry 4.0. In *15th International Scientific Conference on Production Engineering-CIM'2015: Computer Integrated Manufacturing and High Speed Machining*.
- Wells, P., & Seitz, M. (2005). Business models and closed-loop supply chains: A typology. *Supply Chain Management: An International Journal*.
- White, K. P., & Ingalls, R. G. (2015, December). Introduction to simulation. In *2015 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 1741-1755). IEEE.
- Wong, C., Yang, E., Yan, X. T., & Gu, D. (2017, September). An overview of robotics and autonomous systems for harsh environments. In *2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Wu, H. J., & Dunn, S. C. (1995). Environmentally responsible logistics systems. *International journal of physical distribution & logistics management*.
- Wu, L., Yue, X., Jin, A., & Yen, D. C. (2016). Smart supply chain management: a review and implications for future research. *The International Journal of Logistics Management*.
- Yuvaraj, S., & Sangeetha, M. (2016, March). Smart supply chain management using internet of things (IoT) and low power wireless communication systems. In *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)* (pp. 555-558). IEEE.
- Zelbst, P. J., Green, K. W., Sower, V. E., & Reyes, P. M. (2012). Impact of RFID on manufacturing effectiveness and efficiency. *International Journal of Operations & Production Management*.

