



## ÜRETİM ENDÜSTRİSİNİ DÖNÜŞTÜREN TEKNOLOJİ TRENDLERİNE GENEL BİR BAKIŞ

### *An Overview Of Technology Trends That Are Transforming The Manufacturing Industry*

Yunus Emre GÜR<sup>1</sup> ve Koray GÜNDÜZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Arş. Gör. Dr., Fırat Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Elazığ, yegur@firat.edu.tr, orcid.org/0000-0001-6530-0598

<sup>2</sup>Dr., Fırat Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Teknoloji ve Bilgi Yönetimi ABD, Elazığ, gunduz2393@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9734-3290

*Derleme Makalesi/Review Article*

#### Makale Bilgisi

Geliş/Received:  
16.05.2023  
Kabul/Accepted:  
11.09.2023

#### DOI:

10.18069/firatsbed.1297867

#### Anahtar Kelimeler

Endüstri 4.0, Akıllı Üretim Sistemleri, Nesnelerin İnterneti, Siber-Fiziksel Sistemler, Büyük Veri Analitiği.

#### Keywords

Industry 4.0, Intelligent Manufacturing Systems, Internet of Things, Cyber-Physical Systems, Big Data Analytics.

#### ÖZ

Bilgi ve iletişim teknolojisi hızla gelişmekte ve bulut bilişim, Nesnelerin İnterneti, büyük veri analitiği ve yapay zekâ gibi birçok yıkıcı teknoloji ortaya çıkmaktadır. Bu teknolojiler üretim endüstrisine nüfuz etmekte ve endüstriyel üretimin dördüncü aşamasının (yani Endüstri 4.0) gelişini belirleyen siber-fiziksel sistemler (CPS) aracılığıyla fiziksel ve sanal dünyaların kaynaşmasını sağlamaktadır. Endüstri 4.0, imalat işletmelerini etkileyen çok sayıda dijital teknolojiyi kapsamaktadır. CPS'nin üretim ortamlarında yaygın olarak uygulanması, üretim sistemlerini giderek daha akıllı hale getirmektedir. Bununla birlikte, üretim yaşam döngüsü süreçlerinde Endüstri 4.0'ı etkinleştiren teknolojilerin uygulamaları hakkında kapsamlı araştırmalar hala eksikliğini sürdürmektedir.

Endüstri 4.0'ın üretim endüstrisinde uygulanmasına ilişkin araştırmaları ilerletmek için bu çalışmada, ilk olarak, Endüstri 4.0 için kavramsal bir çerçeve sunulmuştur. İkinci olarak, bu çerçevede sunulan ön uç teknolojiler ile ilgili örnek senaryolar açıklanmıştır. Buna ek olarak, Endüstri 4.0 temel teknolojileri ve bunların Endüstri 4.0 akıllı üretim sistemlerine yönelik olası uygulamaları gözden geçirilmiştir. Son olarak, zorluklar ve gelecek perspektifleri belirlenmiş ve tartışılmıştır.

#### ABSTRACT

Information and communication technology is developing rapidly and many disruptive technologies such as cloud computing, Internet of Things, big data analytics and artificial intelligence are emerging. These technologies permeate the manufacturing industry and enable the fusion of the physical and virtual worlds through cyber-physical systems (CPS), which marks the advent of the fourth stage of industrial production (i.e. Industry 4.0). Industry 4.0 encompasses a large number of digital technologies affecting manufacturing businesses. The widespread application of CPS in production environments is making production systems increasingly intelligent. However, there is still a lack of comprehensive research on the applications of technologies enabling Industry 4.0 in manufacturing lifecycle processes.

In order to advance research on the application of Industry 4.0 in the manufacturing industry, firstly, a conceptual framework for Industry 4.0 is presented in this study. Secondly, sample scenarios related to front-end technologies presented in this framework are explained. In addition, Industry 4.0 core technologies and their possible applications for Industry 4.0 smart manufacturing systems are reviewed. Finally, challenges and future perspectives are identified and discussed.

**Atf/Citation:** Gür, Y. E. ve Gündüz, K. (2023). Üretim Endüstrisini Dönüştüren Teknoloji Trendlerine Genel Bir Bakış. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 33, 3, 1339-1354.

**Sorumlu yazar/Corresponding author:** Yunus Emre GÜR, yegur@firat.edu.tr

## 1. Giriş

Günümüzde sürekli olarak yeni teknoloji trendleri ortaya çıkmaktadır. Sistemlerin artış eğilimi gösteren rekabet ortamında hayatta kalabilmeleri ve büyüebilmeleri için trend olan teknolojilere uyum sağlaması gerekmektedir. Bulut bilişim, nesnelerin interneti (IoT), yapay zekâ, blokzincir, büyük veri analitiği, sanal ve artırılmış gerçeklik, 5g ağı vb. teknolojiler, mevcut bilgi sistemlerinin farklı yönlerden desteklenmesine geniş ölçüde katkıda bulunmaktadır (Taherdoost, 2023: 1).

Üretim şirketleri açısından bakıldığında, günümüz tüketicisi, bütünsel bir ürün deneyimi oluşturan bilgi ve hizmetlerin eşlik ettiği en yüksek kalitede ürünler talep etmektedir. Ayrıca, tüketicinin ürünlerin sürdürülebilirliğine, soyağacına ve orijinalliğine daha fazla değer vermesine yönelik gözle görülür bir eğilim görülmektedir. Bu durum, ürünlerin yaşam döngülerinin şeffaflığını endüstri için artan bir endişe haline getirmektedir (El Kadiri vd., 2016: 14). Üreticilerin bu zorlukların üstesinden gelmek için ürün düzeyinde ürün yaşam döngüsü yönetimi gibi kavramları dikkate alması gerekmektedir. Bu kapsamda üreticilerin, ürün yaşam döngüsünde farklı bilgi teknolojileri katmanları arasındaki bilgi döngülerinin (veri toplama, ara katman ve uygulama katmanı yazılımına ve bilgi dönüşümünden işletmeye kadar tüm yaşam döngüsü boyunca) tüm paydaşlar için verimli bir şekilde sağlaması gerekmektedir. Ayrıca, ürünle ilgili verilerin bütüncül kullanılabilirliği önem arz etmektedir. Tüketici tarafından talep edilen ürün deneyimini tutarlı bir şekilde sunmak için, ürün yaşam döngüsü boyunca üretilen bilgilerin elde edilmesi, yönetilmesi ve işlenmesi gerekmektedir. Bunun için Fleischmann vd. (1997), Jun vd. (2007) ve Guédria vd. (2009) tarafından farklı teknolojik çözümler önerilmektedir.

Endüstri 4.0, geleneksel üretim sistemlerini dönüştüren teknolojik gelişmelere (nesnelerin interneti (IoT), yatay ve dikey sistem entegrasyonu, simülasyon, otonom robotlar, büyük veri ve analitik, artırılmış gerçeklik, katmanlı üretim, bulut bilgi işlem ve siber güvenlik) dayalı dokuz sütunun birleşimidir (Rüßmann vd., 2015: 1). Ayrıca, tedarikçiler, üreticiler ve müşteriler arasındaki geleneksel ilişkileri dönüştürürken üretim sistemlerini tam olarak entegre etmeyi ve otomatikleştirmeyi ve tüm değer zinciri boyunca akışları optimize etmeyi amaçlamaktadır (Rüßmann vd., 2015: 1). Kache ve Seuring (2017), kurumsal ve tedarik zinciri perspektifinden büyük veri analitiğinin ortaya çıkışını incelerken, operasyonel verimlilik bakımından müşteri davranışı düzeylerine kadar değişen 43 fırsat ve zorluğu tespit etmiştir. Endüstri 4.0'ı oluşturan dokuz teknolojik gelişme; maliyet, kalite, hizmet seviyeleri ve esnekliğin optimizasyonu aracılığıyla rekabet gücünü artırmak için yeni stratejik fırsatlar sunmaktadır. Teknolojik ilerlemeler, değer zinciri boyunca, üretim yeri ve her bir birimin nasıl yönetileceği vb. konulardaki kararları etkilemektedir (Ferdows, 2018: 394). Ayrıca, parti halinde üretim yerine tek bir ürünü ekonomik bir şekilde üretmek, maliyetleri aşırı derecede etkilemeden nihai esneklik ve kişiselleştirme sağlamaktadır. İleri düzey teknolojiler, süreçleri basitleştirmekte, fabrikasyon ve montaj arasındaki farkı ortadan kaldırmakta, teslim sürelerini kısaltmakta, stokları ve lojistik maliyetlerini azaltarak tedarik zincirini düzene sokmaktadır (MacCarthy vd., 2016: 1704).

Bununla birlikte, siber fiziksel sistemlerin karmaşıklığı ve heterojenliği, Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanmasıyla ilgili endişelere yol açabilmektedir. Endüstri 4.0, imalat alanıyla uğraşan akademisyenler ve uygulayıcılar arasında nispeten yeni bir fenomen olduğundan, imalat şirketlerinde Endüstri 4.0 teknolojisinin uygulanmasına ilişkin ampirik veriler ve yayınlanmış çalışmalar hala seyrek. Bibby ve Dehe (2018), Frank vd. (2019) ve Wagire vd. (2020)'nin çalışmaları, Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulama düzeyine ve teknoloji benimseme modellerinin belirlenmesine odaklanmaktadır. Endüstri 4.0'ın ortaya çıkan teknolojilerinin benimsenmesi kendi kendini desteklemediğinden, Endüstri 4.0'ı başarılı kılmak adına mühendislik teknolojisinin yanı sıra en son ve gelişmiş bilgi ve iletişim teknolojilerinden yararlanmak, araştırmacıların şu anda karşı karşıya olduğu zorluklardan biridir (Xu vd., 2018: 2943). Literatür, geleneksel olarak iki ana yaklaşımı tanımlamaktadır. Bunlar, artımlı/evrimci yaklaşıma karşı radikal/devrimci yaklaşımdır (Dewar ve Dutton 1986; Bond 1999; Johnston vd., 2001; Willcocks, 2002; Eardley vd., 2008; Kim vd., 2012; Schniederjans, 2018). Endüstri 4.0'ı hem bir evrim hem de bir devrim olarak kavramsallaştıran Calabrese vd. (2020) dışında, Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanmasından kaynaklanan gelişmeleri değerlendiren hiçbir çalışma yoktur. Ayrıca Calabrese vd. (2020), üreticilerin Endüstri 4.0'ın devrim niteliğindeki yönlerini elde etmede birçok sınırlılığın olduğunu kabul etmektedir. Bu makale, özellikle bu konuya odaklanan bir dizi makaleye atıfta bulunarak üretim endüstrisini dönüştüren ve bilgi sistemlerinde trend olan teknolojilere kavramsal bir çerçeve sunarak, bunların özelliklerine, avantajlarına ve zorluklarına genel bir bakış açısı getirmeyi amaçlamıştır.

## 2. Endüstri 4.0 Teknolojileri İçin Kavramsal Bir Çerçeve

Endüstri 4.0 teknolojileri, Frank vd. (2019)'nin çalışmasında sunmuş olduğu ve Şekil 1'de gösterilen kavramsal çerçevede önerildiği gibi, ana amaçlarına göre iki farklı katmana ayrılabilir. Bu katmanlar, gelişen teknolojilere dayalı üretim faaliyetlerinin dönüşümünü (Akıllı Üretim) ve ürünün sunulma biçimini (Akıllı Ürünler) kapsamaktadır. Buna ek olarak, diğer katmanlar ise hammaddelerin ve ürünün teslim edilme şeklini (Akıllı Tedarik Zinciri) ve çalışanların, gelişen teknolojilerin desteğine dayalı olarak faaliyetlerini gerçekleştirme yollarını (Akıllı Çalışma) kapsamaktadır (Frank vd., 2019: 16).



Şekil 1. Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Teorik Çerçevesi, **Kaynak:** Frank vd., 2019: 16

Ön uç teknoloji katmanındaki dört “akıllı” boyut, operasyonel ve pazar ihtiyaçları ile ilgilidir. Ön uç teknoloji katmanının merkezi boyutu akıllı üretimdir ve diğer boyutlar bununla bağlantılıdır. Ön uç katmanı, Şekil 1’de gösterilen başka bir katmana dayanmaktadır. Bunlar, ön uç teknolojiler için bağlantı ve zekâ sağlayan teknolojileri kapsayan “temel teknolojilerdir”. Bu son katman, Endüstri 4.0 konseptini mümkün kılan ve bu konsepti önceki endüstriyel aşamalardan ayıran katmandır. Ayrıca bu katman, ön uç teknolojilerin eksiksiz bir entegre üretim sistemine bağlanmasına imkân sağlamaktadır (Thoben vd., 2017: 4). Aşağıdaki alt bölümlerde, Şekil 1’deki çerçevede önerilen her bir katman tanımlanmaktadır. Böylece, bu teknolojilerin üretim endüstrisinde nasıl kullanıldığını ve uygulama modellerinin takip edilip edilmediği anlamak amaçlanmaktadır.

### 2.1. Akıllı Üretim ve Akıllı Ürünler

Akıllı üretim, Amerika Birleşik Devletleri’ndeki Enerji Bakanlığı (DoE) ve Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) gibi çeşitli kurumlar tarafından ortaya atılan bir terimdir. Wallace ve Riddick (2013), akıllı üretimi kısaca “akıllı, verimli ve duyarlı operasyonları gerçekleştirmek için atölye düzeyinde ve üzerinde bilgi teknolojisinin veri yoğun bir uygulaması” olarak tanımlamaktadır. Literatürde daha kapsamlı tanımlar mevcut olsa da, bunların tümü, ister imalathanede (Lu vd., 2016: 4), ister fabrikada (Choi vd., 2015: 1107) ister tedarik zincirinde olursa olsun (Davis vd., 2015: 143), tedarik ağının tüm seviyelerinde üretim operasyonlarını iyileştirmek için bilgi ve iletişim teknolojisinin (BİT) ve gelişmiş veri analitiğinin kullanımını vurgulamaktadır. Bazı yazarlar bir adım daha ileri giderek, akıllı üretim çerçevesini üretimin ötesine taşıyarak yaşam döngüsü perspektifini vurgulamışlardır (Ivezic vd., 2014: 46). Akıllı üretim, veri odaklı, bağlantılı bir tedarik vizyonunu gerçekleştirmek için siber-fiziksel üretim sistemleri (CPPS), IoT, robotik/otomasyon, büyük veri analitiği ve bulut bilişim gibi çeşitli teknolojileri birleştirmektedir. Akıllı üretimi diğer birçok girişimden ayıran önemli bir özellik, insan yaratıcılığına yapılan özel vurgudur. Akıllı üretimde teknoloji ve bilgiyi mümkün kılma ürünü ve süreç bilgisi ve verilerinin önemi yaygın olarak kabul edilmektedir (Thoben vd., 2017: 6-7): Akıllı üretim boyutuyla ilgili teknolojiler altı ana amaca ayrılmaktadır. Bunlar sırasıyla; dikey entegrasyon, sanallaştırma, otomasyon, izlenebilirlik, esneklik ve enerji yönetimidir. Fabrikanın dikey entegrasyonu, üretim katından orta ve üst yönetim seviyelerine kadar şirketin tüm hiyerarşik seviyelerini entegre eden gelişmiş bilgi ve iletişim teknoloji sistemlerini içermektedir. Ayrıca bu sistemler, karar verme süreçlerinin insan müdahalesine daha az bağımlı olmasına yardımcı olmaktadır (Schuh vd., 2017: 30). Dikey entegrasyona ulaşmak için atölyedeki ilk adım, tüm fiziksel nesnelere ve parametrelerin sensörler, aktüatörler ve Programlanabilir Mantık Denetleyicileri (PLC) ile dijitalleştirilmesidir (Jeschke vd., 2017: 4). Veriler daha sonra atölyede üretim kontrolü ve teşhis için Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama (SCADA) ile elde edilmektedir. Yönetimsel bilgi katmanlarında, Üretim Yürütme Sistemleri (MES), SCADA’dan veri alarak, Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) sistemine üretim

durumunu bildirmektedir. Tüm sistemler düzgün bir şekilde entegre edildiğinde, üretim siparişlerinin bilgileri de ters yönde (aşağı akış), ERP'den MES'e ve ardından SCADA'ya akarak kurumsal kaynakların üretim siparişlerine dağıtılmasına yardımcı olmaktadır (Jeschke vd., 2017: 4). Bu nedenle dikey entegrasyon, üretim sürecinde daha fazla şeffaflık ve kontrol sağlamak ve atölyede karar verme sürecini iyileştirmeye yardımcı olmaktadır.

Farklı ürün türleri için uyarlanabilirliği artırmak amacıyla akıllı üretim, makineden makineye iletişim (M2M) yoluyla atölyede ağa bağlı makinelerden oluşmaktadır. M2M, makinelerin birbirini anlamasını sağlayan ve üretim hatlarına adaptasyonlarını kolaylaştıran birlikte çalışabilirliğe sahip bir iletişim sisteminden oluşmaktadır (Gilchrist, 2016: 240). Bu yetenek, makinelerin farklı PLC kodlarını taklit eden ve sanal olarak kurulum prosedürlerini doğrulayan sanal devre ile desteklenmekte ve uzun süreli arıza sürelerini önlemektedir (Mortensen ve Madsen, 2018: 94). Bu simülasyon, PLC kodlarının yanı sıra atölyedeki tüm sanallaştırılmış nesnelere gelen verileri de dikkate alan ve ardından üretimi etkileyebilecek çeşitli parametreleri göz önünde bulundurarak operasyonların süreçlerini simüle eden dijital üretim ile daha ileri düzeydedir (Jeschke vd., 2017: 5). Bununla birlikte, akıllı üretim gelişmiş bir otomasyonu teşvik etmektedir. Robotlar, görevleri geçmişe göre daha hassas bir şekilde gerçekleştirerek üretkenliği artırmaktadır. İş akışlarında robotlar ve otomasyon işbirlikçi robotlardan ayrılmaktadır. İlki operasyonel süreçleri otomatikleştirmek için tasarlanmıştır. İkincisi ise insanlarla çalışmak üzere tasarlanarak insanın esnekliğini ve üretkenliğini artırmaya yardımcı olan görevleri desteklemektedir. Buna ek olarak yapay zekâ, akıllı üretime birçok yönden destek vermektedir. Makinelerde gelişmiş analitik araçlar, makine arızalarını, aşırı yükleri veya diğer sorunları izlemek ve tahmin etmek için sensörlerden toplanan verileri analiz edebilmektedir. Bu, üretim sürecindeki beklenmeyen arızalardan kaynaklanan duruş sürelerinin önlenmesine yardımcı olan kestirimci bakımı mümkün kılmaktadır. Yapay zekâyâ sahip makineler ayrıca üretim sürecinin erken aşamalarında ürün uygunsuzluklarını otomatik olarak tespit ederek kalite kontrolünü artırabilmekte ve üretim maliyetlerini azaltabilmektedir. Ayrıca yapay zekâ, ERP gibi sistemleri de tamamlayarak uzun vadeli üretim taleplerini tahmin etmekte ve son dakika siparişlerini ve operasyon kısıtlamalarını göz önünde bulundurarak bunları günlük üretim siparişlerine dönüştürmektedir (Frank vd., 2019: 17).

Ürünleri kişiselleştirmek için eklemeli üretim, Endüstri 4.0 konseptinin gelecek vaat eden bir teknolojisidir. Katmanlı üretim, farklı ürünler üretmek ve aynı kaynakları kullanarak özelleştirme sağlamak için değiştirilebilen dijital modellerin 3B baskısını kullanmaktadır. Katmanlı üretim, geleneksel üretimden daha az atık üreten tek bir süreç gerektirdiğinden, sürdürülebilir üretimi de teşvik etmektedir. Ancak, büyük ölçekli üretimler için, düşük üretim hızı nedeniyle eklemeli imalatın kullanımı hala sınırlıdır (Weller vd., 2015: 43). Son olarak, akıllı üretim, fabrikanın verimliliğini artırmak için enerji yönetimini de (enerji verimliliğini izleme ve iyileştirme) kapsamaktadır. Verimlilik izleme, elektrik şebekelerindeki enerji tüketimine ilişkin verilerin toplanmasına dayanırken; iyileştirme, uygun elektrik oranlarının olduğu zamanlarda yoğun üretim aşamalarını planlayan akıllı enerji yönetimi sistemleri aracılığıyla sağlanmaktadır (Frank vd., 2019: 17). Üretim şirketleri, yukarıda belirtilen akıllı üretim teknolojilerinin uygulanmasına öncelik verdiklerinde sahip olabilecekleri farklı ihtiyaçlara odaklanabilirler. Bununla birlikte, literatürdeki son bulgular, endüstrinin bu teknolojilerin endüstriyel performans için beklediği faydalarda değişiklik gösterdiğini ve şirketlerin daha yüksek bir Endüstri 4.0 olgunluk seviyesine ulaşmak için bu tür teknolojilerin uygulanmasını sistematik olarak düşünmeleri gerektiğini vurgulamaktadır (Dalenogare vd., 2018: 384). Bu durum, akıllı üretim teknolojilerinin Endüstri 4.0 amaçları için birbiriyle ilişkili olabileceğini ve sinerji yaratabileceğini göstermektedir.

## 2.2. Akıllı Tedarik Zinciri ve Akıllı Çalışma

Endüstri 4.0'ın diğer iki tamamlayıcı ön uç teknoloji grubu, akıllı tedarik zinciri ve akıllı çalışmadır. Bu iki teknoloji grubu, akıllı üretim ve akıllı ürünlerden ayrı olarak değerlendirilmektedir çünkü bunlar imalat ve nihai ürünlere değer katma amacına sahipken, akıllı tedarik zinciri ve akıllı çalışma boyutları tamamlayıcı operasyonel faaliyetlere verimlilik sağlama amacına sahiptir. Fabrika dışında *akıllı tedarik zinciri*; tedarik zincirinde operasyonel maliyetler ve teslimat süresi üzerinde etkili olan hammadde ve nihai ürün teslimatını iyileştirmek için fabrikanın dış tedarikçilerle yatay entegrasyonunu destekleyen teknolojileri içermektedir (Frank vd., 2019: 18). Tedarik zincirleri, üretim ve hizmet operasyonlarında çok önemli bir rol oynamaktadır. Hammadde tedarikinden, ürün imalatına ve son müşterilere teslimata kadar varlıkların akışını yönetmeye

yönelik sistematik bir yaklaşım olan tedarik zinciri yönetimi, tedarik ağlarındaki ortakların iş hedeflerini önemli ölçüde etkilemektedir. COVID-19 salgını nedeniyle yaşanan geniş çaplı kesintiler, tedarik zinciri esnekliğinin ve dayanıklılığının önemini göstermiştir. Bu nedenle, dayanıklı ve akıllı bir tedarik zincirleri geliştirmek, üreticiler ve diğer paydaşlar için vazgeçilmez hale gelmiştir. Büyük veri analizi, nesnelerin interneti (IoT), blokzincir vb. gibi yeni bilgi ve iletişim teknolojilerin ortaya çıkması, akıllı tedarik zincirleri geliştirmeyi mümkün kılmaktadır (Zhang vd., 2023: 1075). Yeni teknolojiler (itme) ve sürekli değişen pazarlara uyum sağlama ihtiyacı (çekme) tarafından benimsenen Endüstri 4.0, akıllı üretim için yeni bir platform sağlamakta ve üreticileri müşterilere yakınlaştırmaktadır (Lasi vd., 2014: 239).

Akıllı tedarik zincirinde, akıllı bir bağlantı sistemi oluşturmak adına bir tedarik zincirinin bütün süreçlerini birbirine bağlamak için ileri teknolojiler, özellikle de gelişmekte olan bilgi ve iletişim teknolojileri kullanılmaktadır (Wu, 2016: 396). Farklı yeni teknolojileri ve bunların Endüstri 4.0 kapsamında tedarik zincirleri üzerindeki etkilerini araştıran bazı çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, tedarik zinciri yönetiminde nesnelerin interneti (Ben-Daya vd., 2019), tedarik zincirinde gömülü sürdürülebilir nesnelerin interneti (Manavalan ve Jayakrishna, 2019), tedarik zinciri yönetiminde büyük veri analitiği (Nguyen vd., 2018) gibi çalışmalardır. Bilgi ve iletişim teknolojileri gibi Endüstri 4.0'dan ortaya çıkan yeni teknolojiler, tedarik zinciri performansını çeşitli şekillerde iyileştirme konusunda umut vaat etmektedir (Colin vd., 2015: 833). Ancak, akıllı tedarik zincirlerinin aşamaları arasında farklı karar seviyeleri ile bu ileri teknolojilerin tedarik zinciri yönetimine nasıl dahil edileceği zorlu ve keşfedilmemiş bir sorun olmaya devam etmektedir (Zhang vd., 2023: 1076). Fabrika içinde *akıllı çalışma*, çalışanların görevlerini destekleyen, üretim sistemi gereksinimlerine uyum sağlamak için daha üretken ve esnek olmalarını sağlayan teknolojileri kapsamaktadır (Stock vd., 2018: 263). Hem akıllı tedarik zinciri hem de akıllı çalışma, şirketin operasyonel performansına doğrudan katkı sağladığı için ön uç teknoloji olarak kabul edilmektedir (Frank vd., 2019: 18). Akıllı tedarik zinciri teknolojileri tarafından desteklenen yatay entegrasyon, tedarikçiler ve dağıtım merkezleri ile üretim emirleri hakkında gerçek zamanlı bilgi alışverişini sağlamaktadır (Pfohl vd., 2017: 382). Akıllı üretim, malzemelerin iç izlenebilirliği ve otonom güdümlü araçlar için teknolojileri içeren lojistik içi süreçleri kapsamaktadır (Zhou vd., 2017: 99). Ancak, fabrikaları harici süreçlere bağlamak için başka teknolojilere ihtiyaç vardır. Dijital platformlar, tedarikçileri ve üreticileri entegre ederek bir bulutta görüntülenen bilgilere kolay erişim sağladıkları için bu gereksinimi karşılamaktadırlar (Pfohl vd., 2017: 383). Malların takibi, tedarikçilerle gerçek zamanlı iletişim sayesinde uzaktan izlenebilmektedir. Ayrıca analitik kabiliyetlere sahip dijital platformlar meteorolojik sistemlere bağlandığında teslimat gecikmelerinin önüne geçilebilmektedir. Dijital platformlar ayrıca ürün teslimatını takip ederek ve belirli müşteri taleplerini dikkate alarak müşterilere ulaşabilir (Pfohl vd., 2017: 383). Dijital platformlar aynı zamanda operasyon faaliyetlerinin gerçek zamanlı bilgilerini aralarında paylaşarak şirketin farklı fabrikalarını entegre edebilmektedir. Akıllı çalışma teknolojileri ise çalışanların üretkenliklerini artırmak için daha iyi koşullar sağlamayı ve atölye bilgilerine uzaktan erişim sağlamayı amaçlamaktadır (Wang vd., 2016: 159). Böylece Endüstri 4.0 konseptinde insan ve makineler bütünleşik bir sosyo-teknik mekanizma olarak ele alınmaktadır (Thoben vd., 2017: 5).

### **2.3. Endüstri 4.0 Temel Teknolojileri**

Bu bölümde, nesnelerin interneti, siber fiziksel sistemler, bulut bilişim, büyük veri analitiği ve bilgi ve iletişim teknolojileri dâhil olmak üzere üretimde kullanılan bazı temel teknolojiler incelemektedir.

#### **2.3.1. Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT)**

Nesnelerin İnterneti (IoT), çeşitli nesnelerin veri toplama ve değiş tokuş etme amacıyla ağa bağlanabilmeleri için elektronik sensörler, aktüatörler veya diğer dijital cihazlarla gömülü olduğu bir ağlar arası dünyayı ifade etmektedir (Xia vd., 2012: 1101). Genel olarak Nesnelerin İnterneti, fiziksel nesnelerin, sistemlerin ve hizmetlerin gelişmiş bağlantısını sunarak nesneden nesneye iletişimi ve veri paylaşımını mümkün kılmaktadır. Çeşitli endüstrilerde aydınlatma, ısıtma, işleme, robotik vakumlar ve uzaktan izleme için kontrol ve otomasyon IoT ile sağlanabilmektedir. IoT'deki anahtar teknolojilerden biri, akıllı nesnelere üretmek için kullanılabilen otomatik tanımlama (auto-ID) teknolojisidir. Örneğin, 1982 yılında, Carnegie Mellon Üniversitesi'ndeki araştırmacılar, modifiye edilmiş bir kola makinesine İnternet bağlantılı bir cihaz entegre etmişlerdir ve bu sayede içeceklerin soğuk olup olmadığını internet aracılığıyla bildirilebilmişlerdir (Farooq

vd., 2015: 1). IoT artık her yerde bulunan kablosuz standartlar, veri analitiği ve makine öğrenimi gibi en son teknolojilerin daha büyük bir yakınsaması olarak tasavvur edilmektedir (Xu vd., 2014: 2234). Bu durum, çok sayıda geleneksel alanın ve günlük hayatın her yönüne dâhil olduğu için IoT teknolojisinden etkileneceği anlamına gelmektedir.

Radyo Frekansı Tanımlama (RFID) teknolojisi böyle bir örnek sağlamaktadır. 2020 yılına kadar yaklaşık 20,8 milyar cihazın birbirine bağlı olacağı ve RFID'den tam olarak yararlanacağı bildirilmiştir (Lund vd., 2014: 8). Böyle bir değişim, endüstrinin çoğunu ve özellikle imalat sektörlerini etkileyecektir. RFID teknolojisi, depolarda, üretim atölyelerinde, lojistik şirketlerinde, dağıtım merkezlerinde, perakendecilerde ve imha/geri dönüşüm aşamalarında çeşitli nesnelere tanımlamak için kullanılmaktadır (Wang vd., 2010: 804). Bu tanımlamadan sonra, bu tür nesnelere, hareketlerinden veya algılama davranışlarından büyük miktarda veri oluşturabilen belirli ara bağlantı biçimleri aracılığıyla birbirleriyle bağlantı kurabilmeleri ve etkileşim kurabilmeleri için akıllı algılama yeteneklerine sahiptir. Akıllı nesnelere arasındaki bağlantı önceden tanımlanmıştır; bu tür nesnelere, RFID okuyucuları ve etiketleriyle donatıldıktan sonra takip ettikleri üretim prosedürleri gibi belirli uygulamalar veya mantıklar verilmektedir (Guo vd., 2015: 17). RFID tesisleri, son kullanıcıların yalnızca günlük işlemlerini yerine getirmelerine yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda bu işlemlerle ilgili verileri yakalayıp üretim yönetiminin gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. IoT teknolojileri üretim endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretim atölyelerinden toplanan gerçek zamanlı veriler, otomatikleştirilmiş iş akışlarına sahip en uygun üretim sistemlerini tasarlamak için kullanılabilir. Üretim planlamasına ilişkin optimum kararlar, güçlü analitik yoluyla işlenen ham verilerin sonuçları tarafından belirlenmektedir. Siemens'in Almanya'daki elektronik üretim fabrikasında makineler ve bilgisayarlar, üretim hattı boyunca çalışan yaklaşık 1.000 otomasyon kontrolörü ile operasyonların %75'ini otonom olarak gerçekleştirmektedir. Üretilen parçalar, makinelerle üretim gereksinimlerini ve bundan sonra hangi adımların atılması gerektiğini söyleyen bir ürün kodu aracılığıyla makinelerle iletişim kurmaktadır (Badarinath ve Prabhu, 2017: 115-116). Üretim endüstrisi tipik olarak küresel enerji talebinin üçte birini oluşturmaktadır. Bir IoT uygulaması, atölyedeki fiziksel varlıkların enerji tüketiminin sürekli olarak ölçülmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, varlıkları düşük enerjili durumlara akıllı bir şekilde dönüştürmek için dinamik, kapalı döngü enerji düzenleme algoritmalarına imkân tanımaktadır. Bu da üretim seviyesini korurken (artırma süresine rağmen) enerji tasarrufu sağlamaktadır. BMW'nin Spartanburg üretim tesisinde IoT tabanlı akıllı enerji sayaçları, anormal veya yüksek enerji tüketimi kaynaklarını tahmin etmek ve belirlemek için tesisin enerji tüketimini sürekli olarak ölçmektedir. Bu, ilk yılda 100.000 kWh'in üzerinde toplam enerji tasarrufu sağlamış ve bunun önümüzdeki 10 yılda yaklaşık 25 milyon Euro'luk toplam enerji maliyeti tasarrufuna karşılık geleceği tahmin edilmiştir. Ek olarak sistem, enerji kullanımını izleyerek ekipman arızalarını da belirleyebilmektedir. Örneğin, bir ekipman, üretim parametrelerinde herhangi bir değişiklik olmaksızın daha fazla enerji kullanıyorsa, bunun nedeni muhtemelen arızalanması veya bileşenlerinin aşınması ve yıpranmasıdır (Badarinath ve Prabhu, 2017: 116).

### 2.3.2. Siber Fiziksel Sistem (Cyber Physical System-CPS)

Bir Siber Fiziksel Sistem (CPS), fiziksel nesnelere ve yazılımın yakından iç içe geçtiği, farklı bileşenlerin bilgi alışverişinde bulunmak için sayısız yolla birbirleriyle etkileşime girmesini sağlayan bir mekanizmadır (Baheti ve Gill, 2011: 161). Bir CPS, sibernetik teorisi, makine mühendisliği ve mekatronik, tasarım ve süreç bilimi, üretim sistemleri ve bilgisayar bilimi gibi çok sayıda disiplinler arası metodolojiyi içermektedir. Anahtar teknik yöntemlerden biri, fiziksel nesnelere ile bunların hesaplamalı öğeleri veya hizmetleri arasında oldukça koordineli ve birleşik bir ilişki sağlayan gömülü sistemlerdir (Tan vd., 2008: 1). CPS özellikli bir sistem, geleneksel bir gömülü sistemden farklı olarak, kontrol algoritmaları ve hesaplama kapasiteleri gibi siber iç içe geçmiş hizmetleriyle birlikte fiziksel girdi ve çıktı ile tasarlanmış ve geliştirilmiş ağ bağlantılı etkileşimler içermektedir. Bu nedenle, çok sayıda sensör bir CPS'de önemli roller oynamaktadır. Örneğin, dokunmatik ekranlar, ışık sensörleri ve kuvvet sensörleri gibi farklı amaçlara ulaşmak için CPS'de yaygın olarak birden fazla duyuşal cihaz kullanılmaktadır. Bununla birlikte, birkaç farklı alt sistemi entegre etmek zaman alıcı ve maliyetlidir ve tüm sistemin çalışır durumda tutulması gerekmektedir. CPS uygulamalarının heterojenliği ve karmaşıklığı, yüksek güvenilirliğe sahip, güvenli ve sertifikalandırılabilir sistemlerin ve kontrol metodolojilerinin geliştirilmesi ve tasarlanmasında çeşitli zorluklara neden olmaktadır (Derler vd., 2012: 26). Birçok endüstri, CPS alanında projeler başlatmıştır. Örneğin, Festo Motion Terminal; mekanik,

elektronik, yerleşik sensörler ve kontrol ile yazılım/uygulamaların akıllı bir birleşiminden tam olarak yararlanan standartlaştırılmış bir platformdur. Dijital pnömatik, kendi kendini benimseyen ve ayarlayan alt sistemlere olanak tanımaktadır. Tipik CPS uygulamaları, sensör tabanlı iletişim sağlayan otonom sistemlerin kullanılması şeklinde rapor edilmiştir. Çok sayıda kablosuz sensör ağı, çevresel hususları denetleyebilmekte, böylece çevreden gelen bilgiler merkezi olarak kontrol edilebilmekte ve karar verme için yönetilebilmektedir (Zhong vd., 2017: 620-621).

Bununla birlikte Siber Fiziksel Üretim Sistemleri (CPPS), süreçlerden makinelere, üretim ve lojistik ağlarına kadar üretimin tüm seviyeleri içinde ve genelinde bağlama dayalı olarak birbirine bağlanan otonom ve işbirlikçi unsurlardan ve alt sistemlerden oluşmaktadır. Burada CPPS'nin üç ana özelliğinin altı çizilmelidir. Birincisi, istihbarattır yani unsurlar çevrelerinden bilgi alabilmekte ve otonom hareket edebilmektedir. İkinci özellik bağlılıktır, yani işbirliği ve ortak çalışma için sistemin diğer unsurlarıyla ve internette mevcut olan bilgi ve hizmetlerle bağlantı kurma ve kullanma yeteneğidir. Üçüncü özellik ise iç ve dış değişikliklere karşı duyarlılıktır (Monostori vd., 2016: 623-624). Birçok ülke, küresel ekonomide rekabet edebilirliği sürdürmek için gelecek vaat eden bir konsept olarak CPS'leri geliştirme adına yatırım yapmaktadır. Mühendisler, endüstri uzmanları ve bilgisayar bilimcileri arasındaki çok disiplinli işbirliği, çeşitli sektörlerdeki gereksinimleri, fırsatları ve zorlukları belirleyerek CPS'lerin tasarlanması ve geliştirilmesindeki ilerlemeyi hızlandırmıştır. Bu gelişmeler tıp ve sağlık, biyoloji, sivil yapılar, otonom araçlar, akıllı üretim ve güç dağıtımını dahil olmak üzere birçok alanda önemli etkilere sahip olmuştur (Zhong vd., 2017: 621).

### **2.3.3. Bulut Bilişim**

Bulut bilişim, uygulamaların internet üzerinden sunulduğu ve veri merkezlerindeki donanım ve sistem yazılımlarının bu hizmetleri sağladığı, bir yardımcı program olarak bilgi işlem ve bir hizmet olarak yazılım toplamı şeklinde tanımlanmaktadır (Fernando vd., 2013: 84). Bulut teknolojisi, bilgi işlem hizmeti pazarında devrim yaratan isteğe bağlı hizmet ve kaynak erişimi sağlamaktadır. Bulut teknolojisinin sağladığı esneklik ve sınırsız kaynak, imalatçıları üretim süreçlerini iyileştirme ve yenileme çabasıyla bulut uygulama hizmetinden yararlanmaya motive etmiştir. Bulut uygulama hizmeti, üreticilere bulut tabanlı yazılım uygulaması, web tabanlı yönetim panosu ve bulut tabanlı işbirliği sağlayarak üretim sürecini, yönetimi ve izlemeyi buluta getirerek bulut üretiminin doğuşunu sağlamıştır. Bulut uygulama hizmeti genellikle Hizmet Olarak Altyapı (IaaS), Hizmet Olarak Platform (PaaS) ve Hizmet Olarak Yazılım (SaaS) olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır (Xu, 2012: 75). SaaS, kullanıcılara Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yazılımı ve Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) yazılımı gibi uygulamaları etkinleştirmek ve kullanmak için temel fiziksel kaynakları sağlamakta ve kullanıcıya sorunsuz bir deneyim sunmaktadır. PaaS ise kullanıcılara fiziksel altyapıdan yazılım platformuna kadar çeşitli kaynaklar sağlamakta, kullanıcıların web sunucusu, veritabanı ve işletim sistemi gibi tercih ettikleri platformda kaynak kullanılabilirliği ve bakımı endişesi olmadan uygulama oluşturmasına olanak tanımaktadır. IaaS, kullanıcılara fiziksel kaynak sağlamakta ve kullanıcıların kendi tercih ettikleri platform ve yazılım yapılandırmasını devreye almalarına olanak tanımaktadır. IaaS, PaaS, SaaS, kullanıcılara bulut üzerinden İnternet tabanlı kaynak ve hizmet erişimi sağlamaktadır. Üretim bilgilerinin işlenmesi ve yönetimi için bulut teknolojisinin sağladığı esneklik ve zengin kaynak, üreticiyi üretim teknolojilerini buluta taşımaya teşvik ederek bulut üretimi olgusunu yaratmaktadır (Wang ve Xu, 2013: 232-233).

Tipik bir üretim kuruluşunda bulutları benimsemenin maliyet avantajı birden fazla olabilmektedir. Geleneksel bilgi teknolojilerinde gerekli olan bazı işlevlerin ortadan kaldırılmasıyla elde edilen tasarruflar önemli olabilir. Bulut tabanlı çözümlerle, şirketin süreç düzeyinde ihtiyaç duyduğu bazı uygulama özelleştirmeleri ve ince ayarlar, bazı akıllı bulut bilişim teknolojileri ile birlikte şirketin bilgi teknolojileri tarafından halledilebilir. Bir süreci yürütmenin farklı bir yolu başlatıldığında, bilgi teknolojisi personeli değişikliği sorunsuz ve daha kısa sürede gerçekleştirebilir. Akıllı iş süreçlerini desteklemek söz konusu olduğunda, bulut bilişim, bir üretici ile toptancı arasındaki veya bir toptancı ile perakendeci arasındaki ticari işlemler için İşletmeler Arası (B2B) çözümler sunmada etkili olabilmektedir. Bulut tabanlı çözümler, daha iyi entegre edilmiş ve daha verimli süreçler sağlamaktadır. Bulut bilgi işlem, gelişmiş operasyonel verimlilik sağlamak adına geleneksel bir süreci buluta taşıyarak üretim işletmelerinin diğer birçok yönünü geliştirmek için de kullanılabilir. Örneğin, bulut bilişim, müşteri kabul süreci için bir uygulamanın geliştirilmesine yardımcı olabilmekte; bu da, şirketin müşteri kabulünün geleneksel sürecinden daha verimli

olmasını sağlamaktadır. Bulut teknolojilerini benimseyen kurumsal işbirliği çok daha geniş bir ölçekte gerçekleşebilir. Kuruluş içinde, talep planlama ve tedarik zinciri organizasyonu bulut tabanlı bir sisteme bağlanabilir ve kuruluşun farklı bölümlerinin satış ekiplerinin üzerinde çalıştığı fırsatlara göz atmasına olanak tanır. Daha geleneksel bir ortamda bu, birkaç oturma toplantısı, birkaç yüz yüze tartışma veya telefon görüşmesini kapsamaktadır (Xu, 2012: 78). Bu durumda bulut, daha etkili işbirlikleri yoluyla insanlara çeviklik, daha fazla şeffaflık ve yetki verebilen işbirliğine dayalı bir ortam sağlamaktadır. Tipik olarak, üretim firmasının bulut tabanlı çözümleri hızlı ve kolay bir şekilde benimseyebilen bazı bölümleri vardır, oysa diğer alanlarda geleneksel kalmak daha iyidir. Bu nedenle, bulutu benimseyen bir üretim kuruluşunun da ihtiyaç duyduğu şey, entegrasyonla başa çıkmak için akıllı bir mekanizmadır.

#### 2.3.4. Büyük Veri Analitiği

Dijital teknolojilerin yaygın olarak ortaya çıkışı ve gelişen bilgi işlem gücü ve endüstriyel Nesnelerin İnterneti'nin (IoT) genişlemesi, yeni nesil ağ bağlantılı, bilgi tabanlı teknolojilere, veri analitiğine ve tahmine dayalı modellemeye yol açmıştır (He ve Wang, 2018: 35). Bu yeni nesil, üreticilere giderek artan miktarda veriden değer elde etmek ve güçlü bir rekabet avantajı sağlamak için benzersiz entegre bilgi işlem yetenekleri sağlamaktadır (Belhadi vd., 2019: 1). Manyika vd. (2011)'ne göre büyük veri, boyutu tipik veritabanı yazılım araçlarının yakalama, depolama, yönetme ve analiz etme yeteneğini aşan veri kümelerini içermektedir. Temel olarak, büyük veri, verileri dört nitelikte işleme yeteneği ile karakterize edilmektedir. Bunlar; hacim (verinin boyutu/ölçeği), çeşitlilik (verinin biçimi/biçimi), hız (verinin üretilme hızı) ve doğruluk (verinin belirsizliği/güvenilirliği) şeklindedir. Büyük veri genellikle, karar verme süreçlerini desteklemek için istatistik, matematik, ekonometri, simülasyonlar, optimizasyonlar veya diğer teknikleri uygulayarak verilerden bilgi elde etme becerisini ifade eden Analitik kavramıyla ilişkilendirilmektedir (Arunachalam vd., 2018: 417; Wang vd., 2016b: 99).

Üretim süreçleri için, Büyük Veri Analitiğinin (Big Data Analytic-BDA) birçok zorluğu bulunmaktadır. Aslında, süreç operasyonunun, kontrol bilgisayarlarının ve bilgi sistemlerinin aşırı kullanımı, mevcut üretim süreç operasyon veritabanlarını çok büyük ve devasa hale getirmektedir. Dahası, IoT cihazlarının geleneksel süreç sensörlerinden resimlere, videolara ve dolaylı ölçüm teknolojilerine sürekli artan ilerlemesiyle, gelecekteki akıllı üretim süreçlerinden elde edilen verilerin büyük ölçüde artması beklenmektedir (Qin, 2014: 3093). Bu nedenle, yalnızca üretim süreçlerini bu hızlanan devasa veriye dayalı olarak analiz edebilen üreticilerin, belirleyici bir rekabetçi varlık olarak veri çağında gelişmiş üretimin dönüşümünün bir sonraki aşamasında hayatta kalabileceği konusunda bir fikir birliği var gibi görünmektedir. Bu tür üreticiler en iyi ilerleyen süreç akışını tahmin etmekte ve bu bilgiyle proaktif olarak süreçlerini kontrol etmektedir (Krumeich vd., 2014: 261-262). Yukarıda belirtilen hususlar nedeniyle, Büyük Veri Analitiği, üretim süreçleri üzerinde artan bir şekilde ilgi görmektedir. İlk olarak, dağıtılmış kontrol sistemlerinin yaygın kullanımı ve bazı tipik bilgi ve iletişim teknolojilerinin geliştirilmesi, üretim tarzını önemli ölçüde geliştirmiştir. Günümüzün üretim süreçleri, zorlu operasyonlar ve aşırı karmaşık kısıtlamalar içeren belirsiz bir ortamda giderek daha fazla faaliyet göstermektedir (Cheng vd., 2018: 1). Bu nedenle, bu karmaşık süreçlerde birinci ilke modelleri oluşturmak giderek daha zor hale gelmektedir ve geleneksel üretim yönetimi tarzını tatmin eden çok sayıda süreç ve uygulama artık uygun değildir (Cheng vd., 2018: 1; Ge vd., 2017: 20590). Bununla birlikte, üretim yöneticilerinin gerçek zamanlı, dinamik, kendi kendini uyarlayan ve doğru üretim yönetimine olan büyük ihtiyacı, geleneksel yöntemlere yeni zorluklar getirmiştir. Ürün kalitesinin, üretimin ve işlem süresinin kesin tahminini sağlamak için gerçek zamanlı verilerden üretim zekâsı oluşturmak son derece gerekli hale gelmektedir. Bu, sürekli gerçek zamanlı üretim sistemlerini kontrol etmek ve doğru ve zamanında karar vermeyi desteklemenin yanı sıra hataları, kusurları ve diğer bazı anormal durumları belirlemek için daha kısa hesaplama süresi içinde yeni etkili tekniklerle yapılmaktadır (Cheng vd., 2018: 1; He ve Wang, 2018: 35).

Büyük Veri Analitiğine olan coşku ve artan ilgiye rağmen, üretim süreçlerine yönelik temel yetenekleri hakkında çok az şey bilinmektedir. Gerçekten de, üretim süreçlerinde Büyük Veri'yi benimsemeye istekli kuruluşlar, kavramını daha iyi anlamak ve ardından Büyük Veri Analitiği'nden iş değeri elde etmek için mücadele etmektedir (Wamba vd., 2015: 234). Ayrıca, çok az bilim insanı, Büyük Veri Analitiği'nin hala erken bir aşamada olduğunu ve üretim süreçlerinde Büyük Veri Analitiği konusunda henüz keşfedilmemiş yönler olduğunu vurgulamaktadır (Belhadi vd., 2019: 2).



### 2.3.5. Bilgi ve İletişim Teknolojisi (BİT)

Bilgi ve iletişim teknolojisi, birleşik iletişimi ve telekomünikasyonun yanı sıra veri veya bilgiyi depolayabilen, iletebilen ve değiştirebilen diğer teknolojilerin entegrasyonunu vurgulayan genişletilmiş bir bilgi teknolojisi anlamına gelmektedir (Zhong vd., 2017: 622). Bilgi ve iletişim teknolojisi, kablosuz sistemler, kurumsal ara yazılım ve görsel-işitsel sistemler gibi çok çeşitli bilgisayar bilimi ve sinyal işleme tekniklerini kapsamaktadır. Kablolu veya kablosuz iletişim standartları gibi çeşitli elektronik ortamlar aracılığıyla bilgi aktarımına odaklanmaktadır ve üretim operasyonlarının ve karar vermenin büyük ölçüde verilere dayandığı akıllı üretimde çok önemlidir. Bilgi ve iletişim teknolojisinin firma organizasyonu üzerinde belirgin bir etkisi olduğu bulunmuştur, öyle ki fabrika yöneticileri ve çalışanları için daha iyi bilgi ve iletişim teknolojisi, daha fazla özerklik ve daha geniş bir kontrol alanı ile ilişkilidir (Bloom vd., 2014: 3). Örneğin, bilgi ve iletişim teknolojisi, şirketlerin iş çevikliklerini, esnekliklerini ve üretkenliklerini geliştirmelerine yardımcı olduğundan, Avrupa'nın üretim yetkinliğindeki başarılı faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir (Zhong vd., 2017: 622).

Bilgi ve iletişim teknolojisi uygulamaları, eğitim, turizm, üretim, sosyal bilim uygulamaları, telekomünikasyon, sağlık, teletıp ve klinik uygulamalar gibi çok sayıda alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çeşitli endüstrilerdeki bilgi ve iletişim teknolojisi uygulamaları, büyük veri analitiği gibi diğer teknolojilere göre daha uzun bir geçmişe sahiptir. Bunun nedeni, Bilgi ve iletişim teknolojisinin onlarca yıldır kullanımda olan bilgisayar teknolojilerinin bir uzantısı olmasıdır. Bilgi ve iletişim teknolojilerinin mevcut uygulamaları, endüstrideki mevcut bilgi sistemlerinin en son teknolojilerle birleştirilebilmesi için temel olarak bulut bilişim ve IoT gibi diğer teknolojilerle entegrasyona odaklanmaktadır. Bilgi ve iletişim teknolojisi kullanımı, çok sayıda gerçek yaşam vakasında önemli gelişmeler sağlamıştır. Bu nedenle, endüstrideki şirketler mevcut sorunlarını ele almak için çeşitli bilgi ve iletişim teknolojisi tabanlı çözümler aramaktadır. Endüstri 4.0 kapsamında, çeşitli endüstrilerde gelecekteki zorlukların üstesinden gelmek ve gelişen teknolojileri entegre etmek için bilgi ve iletişim teknolojilerine daha fazla güvenileceği öngörülebilmektedir (Zhong vd., 2017: 623).

## 3. Gelecek Perspektifleri

Endüstri 4.0 çağında akıllı üretim için gelecekteki araştırma perspektifleri; akıllı üretim için genel bir çerçeve, veriye dayalı akıllı üretim modelleri, akıllı üretim sistemi, insan-makine işbirliği ve akıllı üretim uygulaması şeklinde olacaktır. Alt bölümlerde bu perspektifler açıklanmaktadır.

### 3.1. Akıllı Üretim İçin Genel Bir Çerçeve

Endüstri 4.0'ın derin entegrasyonu göz önüne alındığında, üretim bilimi ve teknolojisi, BİT ve sensör teknolojisi gelecekte büyük ölçüde entegre olacağından, akıllı üretim için genel bir çerçeve önem arz etmektedir. Bu genel çerçeve, akıllı üretimin uygulanmasına rehberlik edilebilmesi ve standartlaştırılabilmesi için farklı işletmelerde kullanılacak geniş alanları kapsayacaktır. Gelişmiş sensörler, kablosuz iletişim standartları, büyük veri işleme modelleri ve algoritmaları gibi tipik teknolojiler ve uygulamalar bu çerçeveye yerleştirilecektir. Böylece Endüstri 4.0'a temel olacak akıllı bir hiyerarşik mimari oluşturulacaktır. Akıllı üretimi tam olarak uygulamak için ağlar ve Nesnelerin İnterneti gibi platform teknolojilerine, sanallaştırma ve hizmet teknolojisine ve akıllı nesnelere/varlıklar teknolojisine odaklanılmalıdır çünkü müşterilerden gelen özelleştirilmiş gereksinimlerin artması üretim maliyetini artıracaktır. Platform teknolojisi, akıllı tasarım, üretim, lojistik ve tedarik zinciri yönetimi yoluyla esnek ve yeniden yapılandırılabilir üretim sistemlerinden tam olarak yararlanarak maliyeti azaltabilir. Özellikle tasarım ve geliştirme için multipleks platform teknolojisi, son derece özelleştirilmiş ürünler sorununu ele almak için yeni bir çözüm sağlayacaktır (Simpson vd., 2014: 24-25). Buna ek olarak, aşağı ve yukarı akış faaliyetleri gerçekleştirmek adına üretimde işbirlikçi çabaları entegre etmek için daha açık, yenilikçi bir çerçeve gereklidir. Bu nedenle, akıllı üretim için hizmet odaklı kavramlar, Endüstri 4.0'ın temel bileşenleri olacaktır.

Araştırma konularının akıllı tasarım, akıllı makineler, akıllı izleme, akıllı kontrol ve akıllı çizelgeleme olarak kategorize edildiği Endüstri 4.0 akıllı üretim sistemlerinin çerçevesi şu şekildedir (Zhong vd., 2017: 625):

- *Akıllı Tasarım*: Sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik gibi yeni teknolojilerin hızla gelişmesiyle, geleneksel tasarım güncellenecek ve "akıllı çağa" girecektir. Bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar

destekli üretim gibi tasarım yazılımları, CPS'ler ve artırılmış gerçeklik ile entegre üç boyutlu (3D) baskı sayesinde fiziksel akıllı prototip sistemleriyle gerçek zamanlı olarak etkileşime girebilmektedir.

- **Akıllı Makineler:** Endüstri 4.0'da akıllı makineler, akıllı robotlar ve gerçek zamanlı algılama yapabilen ve birbirleriyle etkileşime girebilen diğer çeşitli akıllı nesnelerin yardımıyla elde edilebilmektedir. Örneğin, CPS özellikli akıllı takım tezgâhları, gerçek zamanlı verileri yakalayabilmekte ve bunları bulut tabanlı bir merkezi sisteme gönderebilmektedir, böylece takım tezgâhları ve bunların ikiz hizmetleri, akıllı üretim çözümleri sağlamak üzere senkronize edilebilmektedir.
- **Akıllı İzleme:** İzleme, Endüstri 4.0 üretim sistemlerinin operasyonları, bakımı ve optimum zamanlaması için önemli bir unsurdur. Çeşitli sensör türlerinin yaygın olarak kullanılması, akıllı izlemeyi mümkün kılmaktadır. Örneğin, sıcaklık, elektrik tüketimi, titreşim ve hız gibi çeşitli üretim faktörlerine ilişkin veriler ve bilgiler gerçek zamanlı olarak elde edilebilmektedir.
- **Akıllı Kontrol:** Endüstri 4.0'da, siber-fiziksel üretim kontrol sistemleri geliştirilerek yüksek çözünürlüklü, uyarlanabilir üretim kontrolü (yani akıllı kontrol) sağlanabilmektedir. Akıllı kontrol, temel olarak çeşitli akıllı makineleri veya araçları bulut özellikli bir platform aracılığıyla fiziksel olarak yönetmek için yürütülmektedir. Son kullanıcılar, akıllı telefonları aracılığıyla bir makineyi veya robotu kapatabilmektedir.
- **Akıllı Zamanlama:** Akıllı zamanlama katmanı, sensörler tarafından yakalanan verilerden yararlanmak için temel olarak gelişmiş modeller ve algoritmalar içermektedir. Akıllı planlama için veriye dayalı teknikler ve gelişmiş karar mimarisi kullanılabilir. Örneğin, gerçek zamanlı, güvenilir programlama ve yürütme elde etmek için, hiyerarşik etkileşimli bir mimari kullanan dağıtılmış akıllı modeller kullanılır.

### 3.2. Veriye Dayalı Akıllı Üretim Modelleri

Üretimde RFID ve/veya akıllı sensörler taşıyan dijital cihazların büyük oranda artmasıyla, muazzam miktarda veri üretilecektir. Bu tür veriler, farklı karar verme durumları için kullanılacak zengin bilgi taşımaktadır (Zhong vd., 2016: 581). Bu nedenle, verilerin etkin kullanımı yalnızca üretim verimliliğini artırmayı içermemekte, aynı zamanda lojistik ve tedarik zinciri yönetimi birimleri gibi diğer taraflarla daha fazla çeviklik ve daha derin entegrasyon sağlamaktadır. Örneğin, çip üreticisi Intel, kalite sorunlarını tahmin etmek için üretim ekipmanından aldığı veriler üzerinde bir veri analizi yaklaşımı kullanmıştır. Bu kullanım, kalite testlerinin sayısını büyük ölçüde azaltmış ve üretim hızını artırmıştır. Veri tabanlı model, kalite tahminlerini gerçekleştirmek için saatte 5 TB makine verisi kullanmaktadır (Zhong vd., 2017: 626).

Bir üretim sistemindeki dinamikler, kalite ve verimliliği önemli ölçüde etkileyecektir. Veriye dayalı modeller, bilgi veya bilgi entegrasyonu, veri madenciliği ve veri analitiğine dayalı olarak sistem teşhisi veya tahmini için geçmiş veya gerçek zamanlı verileri tam olarak kullanabilir (Zou vd., 2017: 201; Zhong vd., 2015: 801). Örneğin, yarı iletken imalat endüstrilerinde bozulma tahmini için veri odaklı bir yaklaşım kullanan iki aşamalı bir bakım çerçevesi kullanılmıştır (Luo vd., 2015: 415). Gelecekte, akıllı üretim için veri tabanlı veya bilgiye dayalı modellerin ve hizmetlerin büyük ölçüde benimseneceği açıktır. Anahtar araştırma alanlarından biri, akıllı tasarım ve üretim, üretim modelleme ve simülasyon ve lojistik ve tedarik zinciri yönetimi gibi kurumsal hizmetleri sağlayabilen bir platformda bulut hizmetlerinin bilgi yönetimiyle entegrasyonudur. Bu platform, insan, makine, malzeme, iş ve üretim mantığını birleştirmek için akıllı sensörler veya dijital cihazlarla donatılmış çeşitli üretim nesnelere çok büyük miktarda üretim verisi toplayacaktır. Bulut üzerinden akıllı bir atölye operasyon merkezi, imalat sistemlerinde gelişmiş karar verme için daha gelişmiş veya akıllı modeller ve algoritmalar oluşturmak üzere kendi kendine öğrenen modelleri kullanabilir.

### 3.3. Akıllı Üretim Sistemleri

Akıllı üretim sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesi, tüm işletme ve endüstri yelpazesinde giderek daha fazla işbirliği gerektirmektedir. Bulut tabanlı üretim kaynakları/nesneleri yönetim sistemi gibi işbirlikçi üretim modelleri veya mekanizmaları, çok çeşitli üretim nesnelere merkezi olarak kontrol edecek, böylece akıllı üretim sistemleri düzgün ve etkili bir şekilde çalışabilecektir (Zhong vd., 2015b: 261). Endüstri 4.0 bağlamında, pnömatiklerin dijitalleşmesiyle gösterildiği gibi, daha fazla katma değerli süreçler ve hizmetler oluşturmak için ileri teknolojileri kullanmayı planlayan herhangi bir kuruluş için akıllı üretim sistemleri

temel oluşturmaktadır (Klotz ve Duwe, 2017: 34). Sistemdeki her akıllı bileşenin kendi kendini uyarlayan kararlar alabildiği merkezi olmayan kontrol hizmeti, gelecekte önemli bir araştırma alanını oluşturmaktadır. Örneğin, bir montaj hattının her aşamasında çalışan akıllı bileşenler, senkronize üretim ritmini sürdürmek için hareketli parçalar ve diğer hatlarla sorunsuz bir şekilde işbirliği yapabilmektedir. Otonom akıllı üretim birimleri, akıllı üretim sistemleri için çok önemlidir. Bileşenleri otomatik olarak tanıyabilen, çevrimiçi tesisleri izleyebilen ve iş parçalarını hareket ettirebilen daha gelişmiş gömülü yongalara veya sensörlere dayalıdır. Bu sisteme dayalı üretim uygulamaları, otomatik güdümlü araçlar gibi gelişmiş otonom insansız cihazların yardımıyla daha verimli olacaktır. Gelecekteki temel araştırmalar, daha güvenli bir üretim tesisi için artırılmış ve sanal gerçeklik gibi akıllı üretim sistemlerini etkinleştiren teknolojilere odaklanabilir (Yew vd., 2016: 54). Gelişmiş üretim süreçleri ve hizmetleri, akıllı üretim sistemlerine kolayca entegre edilecek, bu nedenle açık bir platform, üretim şirketleri ve özellikle KOBİ'ler için faydalı olacaktır.

### **3.4. İnsan-Makine İşbirliği**

Endüstri 4.0 kapsamında, insanlar ve makineler, endüstriyel ortamlarda bilişsel teknolojileri kullanarak işbirliği içinde çalışacaktır. Akıllı makineler, konuşma tanıma, bilgisayar görüşü, makine öğrenimi ve gelişmiş senkronizasyon modellerini kullanarak insanların işlerinin çoğunu yerine getirmelerine yardımcı olabilecektir (Antrobus vd., 2017: 333). Bu nedenle, robot gibi makineler için ileri öğrenme modelleri, insan ve makinelerin her türlü çalışma koşulunda birbirini tamamlayan beceriler geliştirmesi açısından önemlidir. Gelecekteki bir araştırma yönü, insanların karar verme modelleriyle verimli ve etkili bir şekilde etkileşime girmesini sağlayan “döngüdeki insan” makine öğrenimi yaklaşımıdır. Bu nedenle, veri özellikli makine öğrenimi mekanizmaları, işbirliğini daha iyi anlamak için insan alanı uzmanlığını veya bilgisini kullanarak yollar sağlayabilmektedir. Örneğin, geleneksel makine öğrenimi sistemleri veya algoritmaları, insan bilgisiyle birleştirilebilmekte, böylece gerçek dünyadaki bir algılama sistemi, insan-makine etkileşimlerini ve iletişimini iyileştirmeye yardımcı olabilmektedir (Zhong vd., 2017: 627). Bununla birlikte, makine zekâsı, insan-makine iş birliğini desteklemede önemli bir rol oynamaktadır, çünkü makineler dinamik durumların mevcut olduğu üretim tesislerinde yapılan her iş ve rolde yardım sağlamaktadır (Xu, 2017: 1893-1894)..

### **3.5. Akıllı Üretim Uygulaması**

Modern dönem imalatının kökleri son yarım yüzyıla dayanmaktadır. Bilgisayar ve makine yapım teknolojisindeki ilerleme imalatta otomasyona yol açmıştır. Günümüzün takım tezgahları büyük ölçüde insan operatörler yerine bilgisayar programları tarafından çalıştırılmaktadır. Malzemeler ve bileşenler otomatik malzeme taşıma sistemleri ile taşınmakta ve otomatik depolama ve geri alma sistemlerinde depolanmaktadır. Bir üretim katının otomasyonunun kapsamına ve derecesine ve çeşitli işlevsel üretim alanlarının entegrasyonuna bağlı olarak, 1980'lerden bu yana otomatik üretimi tanımlamak için esnek üretim hücreleri ve sistemlerinden bilgisayarla entegre üretime ve akıllı üretime kadar farklı terimler kullanılmıştır. Son terim 1990 yılı civarında ortaya atılmış ve Akıllı Üretim Dergisi'nin kurulmasına ve Akıllı Üretim Sistemleri adlı kitabın basılmadan önce yıllardır geliştirilmekte olduğuna işaret etmiştir. Hemen hemen aynı zamanlarda Japonya, 1995 yılında endüstriyel araştırmaları desteklemek amacıyla Akıllı Üretim Sistemi (IMS) Programının kurulmasına yol açan akıllı üretim araştırmalarına başlamıştır.

Gerçek hayattaki şirketlerin en son teknolojilerden yararlanabileceği Endüstri 4.0'da tüm işletmeler veya endüstriler için akıllı üretim uygulamaları önemlidir. Akıllı üretim sistemleri için aracı tabanlı bir çerçeve, üretim planlama ve çizelgeleme sorununa uygun bir çözüm olacaktır, çünkü imalat işletmeleri imalat süreci planlama ve çizelgeleme, atölye izleme ve kontrol ve depo yönetimi gibi çok çeşitli unsurları içerebilmektedir. Ajan tabanlı uygulamalar, iş akışlarını tanımlayabilmekte ve üretim mantığını takip edebilmektedir. Böylece bu unsurlarla ilgili karar verme etkin bir şekilde kolaylaştırılabilmektedir (Shen vd., 2007: 324). Üretim sistemlerindeki otomasyonu örnek olarak ele alırsak, akıllı imalatın uygulanmasını kolaylaştırmak amacıyla, aracı tabanlı bir mimari tarafından etkinleştirilen robotları paralel olarak kontrol etmek için çok aracı teknolojiler kullanılabilmektedir (Priego vd., 2017: 1580).

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu makalede açıklanan teorik çerçeve; üretim endüstrisinde teknolojik yükseltme arayan şirketlere katkıda bulunabilir. Bu doğrultuda; Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanmasına yönelik gereksinimler hakkında bilgiler sağlanmıştır. Önceki araştırmaların da gösterdiği gibi (Dalenogare vd., 2018), özellikle teknoloji gereksinimleri ve potansiyel faydalar konusunda Endüstri 4.0 hala önemli bir belirsizlik olduğu için bu durum, yöneticiler için önem arz etmektedir. Yöneticiler, yalnızca ön uç teknolojilere değil, aynı zamanda Endüstri 4.0'ın uygulanmasına destek sağlayan temel teknolojilere de odaklanmak için bu teorik çerçeveyi kullanabilirler. Bununla birlikte yöneticiler, Endüstri 4.0 konseptinde gelişmek için açıklanan teorik çerçeveyi bir olgunluk uygulama modeli olarak da kullanabilirler.

Makine ve ekipman endüstrisi, işletmeden tüketiciye (B2C) modellerden çok farklı olarak, doğası gereği işletmeden işletmeye (B2B) faaliyetlere odaklanmaktadır. B2B faaliyetleri, şirket ile müşteri arasında daha güçlü etkileşim ve bağlantı ile sonuçlanan daha özel çözümler gerektirmektedir. Bu, doğal olarak, ön uç teknolojilerin farklı boyutlarına verilen ilgiyi etkilemektedir.

Akıllı bir üretim sistemi, üretim ve hizmetlerin entegrasyonunu kullanmaktadır. Ayrıca, endüstriyel talepleri karşılamak için iletişim sürecini, bilgi işlem sürecini ve kontrol sürecini bütünleştirir. Akıllı bir üretim sisteminin uygulanması için bileşik yetenekler ve çok alanlı işbirliği gereklidir. Büyük veri teknolojisi ilerledikçe, veri tabanlı sanal üretim modu ürün kalitesini iyileştirecek, üretim verimliliğini artıracak ve enerji tüketimini azaltacaktır. Ayrıca, büyük veriye dayalı akıllı üretim, geleneksel endüstride devrime yol açacaktır. Endüstri 4.0 çağına ayak uydurmak için çoğu üretim şirketinin için gerçek zamanlı veri toplaması gereklidir. IoT ve CPS bu sorunlara olası çözümler sağlayabilmektedir. RFID ve barkodlama gibi tipik IoT teknolojileri, çeşitli üretim kaynaklarına yerleştirilebilir. Bu şekilde, gerçek zamanlı üretim verilerinin yakalanabilmesi ve toplanabilmesi için birbirleriyle akıllı bir şekilde etkileşim kurabilen ve iletişim kurabilen akıllı üretim nesnelere oluşturulabilmektedir. En son teknolojilerin hızla gelişmesiyle, akıllı sensörler artık sıcaklık, kuvvet, basınç ve nem hakkında gerçek zamanlı verileri toplamak için çok işlevli yetenekleri entegre edebilmektedir. Bu sensörler, çeşitli akıllı üretim nesnelere takılır, böylece üretim operasyonları ve üretim hatları veya çalışma istasyonları, fiziksel operasyonel ve bilgi akışlarıyla senkronize edilebilmektedir. Gelecekte CPS teknolojilerinden yararlanılarak makineler akıllı nesnelere dönüştürülecektir. Akıllı makineler, çalışma durumlarını görselleştirme yaklaşımıyla durumlarını izleyebilen merkezi bir bulut tabanlı "yöneticiye" gerçek zamanlı olarak gönderebilmektedir.

Endüstri 4.0 için akıllı üretim sistemlerinde karar verme, büyük miktarda üretim verisinden çıkarılabilen bilgi ve birikim gerektirmektedir. Üretim tesislerinden gelen büyük verilerle karşı karşıya kalındığında, çeşitli güçlüklerin ele alınması gerekmektedir. İlk olarak, büyük miktarda veri kullanıldığında karar modellerinin bir çözüm oluşturması uzun zaman almaktadır. Üretim planlama ve çizelgelemenin optimizasyonu gibi farklı amaçlar için çeşitli amaçlar kullanılmaktadır. Ancak, karar verme işlemi gerçekleştirilirken kesin veri girişi eksik kalmaktadır. Endüstri 4.0'da karar verme, her zaman üretim ekipmanı ve hizmetlerinden tam olarak yararlanabilen üretim kaynak paylaşımını hedeflemektedir. Bu nedenle yeni bir üretim paradigmasına ihtiyaç vardır. Gelecekteki karar verme iki yöne odaklanmalıdır. Bunlardan ilki, büyük veri analitiği tarafından yönlendirilen karar alma modelleridir. Bu modeller, karar vermeyi desteklemek için büyük miktarda üretim verisinden yararlı bilgileri ortaya çıkarabilmektedir. Derin makine öğrenimi gibi ileri teknolojiler veya algoritmalar, büyük veri analitiğinin hizmetler olarak kapsüllendiği bu modellere entegre edilebilmektedir.

Endüstri 4.0'ın gerçek faydası, uygulayıcılar için hala bir endişe kaynağıdır ve böyle bir çalışma teori ve pratik için yardımcı olabilecektir. Dalenogare vd. (2018) yakın zamanda böyle bir etkiyi yalnızca endüstri düzeyinde incelemiş ve firma düzeyinde analiz ihtiyacına vurgu yapmışlardır. Bu çalışmada, teknolojilerin nasıl benimsendiğini ve birbirleriyle nasıl ilişkilendirildiklerini anlamak için bir temel sağlanmıştır. Bu başlangıç noktasından hareketle, gelecekteki araştırmalar, bu teknolojilerin firma düzeyinde endüstriyel performansı nasıl etkilediğini inceleyerek ilerleyebilir. Buna ek olarak, büyük şirketlerin beklendiği gibi Endüstri 4.0'a daha hazır olduğu görülmektedir. Ayrıca literatür, küçük şirketlerin dijital dönüşümde karşılaştıkları birçok engelle işaret ettiğinden (Kagermann vd., 2013; Muller vd., 2018), gelecekteki araştırmalar bu tür şirketleri hangi faktörlerin yenilik yapmalarını desteklediğini anlamak için derinlemesine inceleyebilir. Bu makalede, Endüstri 4.0 için teorik bir çerçeve sunulup, ön uç teknolojiler ve temel teknolojiler ve üretim endüstrisinde gelecekteki uygulama perspektifleri ele alınmıştır. Ayrıca, akıllı üretimin Endüstri 4.0'da merkezi bir role sahip olduğu ve akıllı ürünler ile güçlü bir şekilde bağlantılı olduğu

vurgulanmıştır. Ayrıca, ön uç teknolojilerinin akıllı üretimi nasıl tamamladığı da gösterilmiştir. Bu makalenin, üretim endüstrisini ileriye taşımaya katkıda bulunmaları için araştırmacıları ve endüstri uygulayıcılarını bilgilendirip ilham vermesi beklenmektedir. Ayrıca, tartışılan kavramlar, merakla beklenen Dördüncü Sanayi Devrimi'ni gerçekleştirme çabasında yeni fikirlere yol açacaktır.

### Kaynaklar

- Antrobus V, Burnett G, and Krehl C. (2017). Driver-Passenger Collaboration as a Basis for Human-Machine Interface Design for Vehicle Navigation Systems. *Ergonomics*, 60(3): 321–332.
- Arunachalam, D., Kumar, N., and Kawalek, J. P. (2018). Understanding Big Data Analytics Capabilities in Supply Chain Management: Unravelling the Issues, Challenges and Implications for Practice. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 114, 416-436.
- Badarinath, R., and Prabhu, V. V. (2017). Advances in Internet Of Things (Iot) in Manufacturing. In *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS, Hamburg, Germany, September 3-7, Proceedings, Part I*, 111-118.
- Baheti R, and Gill H. (2011). Cyber-physical systems. In: Samad T, Annaswamy AM, Editors *The Impact of Control Technology: Overview, Success Stories and Research Challenges*. New York: IEEE Control Systems Society, 161–166.
- Baines, T., Ziaee Bigdeli, A., Bustinza, O. F., Shi, V. G., Baldwin, J., and Ridgway, K. (2017). Servitization: Revisiting the State-of-the-Art and Research Priorities. *International Journal of Operations & Production Management*, 37(2), 256-278.
- Belhadi, A., Zkik, K., Cherrafi, A., and Sha'ri, M. Y. (2019). Understanding Big Data Analytics for Manufacturing Processes: Insights From Literature Review and Multiple Case Studies. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106099.
- Ben-Daya, M., Hassini, E., and Bahroun, Z. (2019). Internet of Things and Supply Chain Management: A Literature Review. *International Journal of Production Research*, 57(15–16), 4719–4742.
- Bibby, L., and B. Dehe. (2018). Defining and Assessing Industry 4.0 Maturity Levels–Case of the Defence Sector. *Production Planning & Control*, 29 (12), 1030–1043. doi:10.1080/09537287.2018.1503355.
- Bloom N, Garicano L, Sadun R, and Van Reenen J. (2014). The Distinct Effects of Information Technology and Communication Technology on Firm Organization. *Manage Sci*, 60(12), 2859–2885.
- Bond, T. C. (1999). The Role of Performance Measurement in Continuous Improvement. *International Journal of Operations & Production Management* 19 (12), 1318–1334. doi:10.1108/01443579910294291.
- Calabrese, A., M. Dora, N. Levialdi Ghiron, and L. Tiburzi. (2020). Industry's 4.0 Transformation Process: How to Start, Where to Aim, What to Be Aware of. *Production Planning & Control* 32, 1–21.
- Chiang, L., Lu, B., and Castillo, I. (2017). Big Data Analytics in Chemical Engineering. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 8, 63-85.
- Choi, S., Kim, B. H. and Do Noh, S. (2015). A Diagnosis and Evaluation Method for Strategic Planning and Systematic Design of A Virtual Factory in Smart Manufacturing Systems. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 16(6), 1107–1115,
- Colin, M., Galindo, R., and Hernández, O. (2015). Information and Communication Technology As A Key Strategy for Efficient Supply Chain Management in Manufacturing Smes. *Procedia Computer Science*, 55, 833–842.
- Dalenogare, L. S., G. B. Benitez, N. F. Ayala, and A. G. Frank. (2018). The Expected Contribution of Industry 4.0 Technologies for Industrial Performance. *International Journal of Production Economics*, 204, 383–394. doi:10.1016/j.ijpe.2018.08.019.
- Davis, J., Edgar, T., Graybill, R., Korambath, P., Schott, B., Swink, D., Wang, J. and Wetzel, J. (2015). Smart Manufacturing. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 6, 141–160.
- Derler P, Lee EA, and Vincentelli AS. (2012). Modeling Cyber-Physical Systems. *Proc IEEE*, 100(1), 13–28.
- Dewar, R. D., and J. E. Dutton. (1986). The Adoption of Radical and Incremental Innovations: An Empirical Analysis. *Management Science*, 32 (11), 1422–1433. doi:10.1287/mnsc.32.11.1422.
- E. Wallace and F. Riddick, (2013). Panel on Enabling Smart Manufacturing. State College, USA.
- Eardley, A., H. Shah, and A. Radman. (2008). A Model for Improving the Role of IT in BPR. *Business Process Management Journal*, 14(5), 629–653. doi:10.1108/14637150810903039.

- El Kadiri, S., Grabot, B., Thoben, K. D., Hribernik, K., Emmanouilidis, C., Von Cieminski, G., and Kiritsis, D. (2016). Current Trends on ICT Technologies for Enterprise Information Systems. *Computers in Industry*, 79, 14-33.
- Farooq MU, Waseem M, Mazhar S, Khairi A, and Kamal T. (2015). A Review on Internet of Things (IoT). *Int J Comput Appl*, 113(1), 1–7.
- Ferdows, K. (2018). Keeping Up with Growing Complexity of Managing Global Operations. *International Journal of Operations & Production Management*, 38(2), 390–402. doi:10.1108/IJOPM-01-2017-0019.
- Fernando, N., Loke, S. W., and Rahayu, W. (2013). Mobile Cloud Computing: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 29(1), 84-106.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J. A., and Van Wassenhove, L. N. (1997). Quantitative Models for Reverse Logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 1-17.
- Frank, A. G., G. H. Mendes, N. F. Ayala, and A. Ghezzi. (2019). Servitization and Industry 4.0 Convergence in the Digital Transformation of Product Firms: A Business Model Innovation Perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 141, 341–351. doi:10.1016/j.techfore.2019.01.014.
- Frank, A. G., L. S. Dalenogare, and N. F. Ayala. (2019). Industry 4.0 Technologies: Implementation Patterns in Manufacturing Companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15–26. doi:10.1016/j.ijpe.2019.01.004.
- Ge, Z., Song, Z., Ding, S. X., and Huang, B. (2017). Data Mining and Analytics in the Process Industry: The Role of Machine Learning. *Ieee Access*, 5, 20590-20616.
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*. Apress. New York.
- Guo ZX, Ngai EWT, Yang C, and Liang X. (2015). An RFID-Based Intelligent Decision Support System Architecture for Production Monitoring and Scheduling In A Distributed Manufacturing Environment. *Int J Prod Econ*, 159, 16–28.
- He, Q. P., and Wang, J. (2018). Statistical Process Monitoring As A Big Data Analytics Tool for Smart Manufacturing. *Journal of Process Control*, 67, 35-43.
- Ivezic, N., Kulvatunyou, B. and Srinivasan, V. (2014). On Architecting and Composing Through-life Engineering Information Services to Enable Smart Manufacturing, *Procedia CIRP*, 22, 45-52.
- Jeschke, S., Brecher, C., Meisen, T., Özdemir, D., and Eschert, T. (2017). Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems. *Springer International Publishing*, 3-19
- Johnston, R., L. Fitzgerald, E. Markou, and S. Brignall. (2001). Target Setting for Evolutionary and Revolutionary Process Change. *International Journal of Operations & Production Management*, 21(11), 1387–1403. doi:10.1108/01443570110407409.
- Jun, H. B., Kiritsis, D., and Xirouchakis, P. (2007). Research issues on closed-loop PLM. *Computers in Industry*, 58(8-9), 855-868.
- Kache, F., and S. Seuring. (2017). Challenges and Opportunities of Digital Information at the Intersection of Big Data Analytics and Supply Chain Management. *International Journal of Operations & Production Management*, 37(1), 10–36. doi:10.1108/IJOPM-02-2015-0078.
- Ketteni E, Kottaridi C, and Mamuneas TP. (2015). Information and Communication Technology and Foreign Direct Investment: Interactions and Contributions to Economic Growth. *Empir Econ*, 48(4), 1525–1539.
- Kim, D. Y., V. Kumar, and U. Kumar. (2012). Relationship between Quality Management Practices and Innovation. *Journal of Operations Management*, 30(4), 295–315. doi:10.1016/j.jom.2012.02.003.
- Klotz E, and Duwe J. (2017). A Pneumatic Revolution in Automation. *Control Eng Europ*, Apr, 34–35.
- Krumeich, J., Werth, D., and Loos, P. (2016). Prescriptive Control of Business Processes: New Potentials Through Predictive Analytics of Big Data in the Process Manufacturing Industry. *Business & Information Systems Engineering*, 58, 261-280.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., and Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242
- Lu, Y., Morris, K. C. and Frechette, S. (2016). Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems. *National Institute of Standards and Technology*.
- Lund D, MacGillivray C, Turner V, and Morales M. (2014). Worldwide and Regional Internet of Things (IoT) 2014–2020 Forecast: A Virtuous Circle of Proven Value and Demand. *Framingham: International Data Corporation*; May, Report No.: IDC #248451.
- Luo M, Yan HC, Hu B, Zhou JH, and Pang CK. (2015). A Data-Driven Two-Stage Maintenance Framework for Degradation Prediction in Semiconductor Manufacturing Industries. *Comput Ind Eng*, 85, 414–422.

- MacCarthy, B. L., C. Blome, J. Olhager, J. S. Srai, and X. Zhao. (2016). Supply Chain Evolution—Theory, Concepts and Science. *International Journal of Operations & Production Management*, 36(12), 1696–1718. doi:10.1108/IJOPM-02-2016-0080.
- Manavalan, E., and Jayakrishna, K. (2019). A Review of Internet of Things (Iot) Embedded Sustainable Supply Chain for Industry 4.0 Requirements. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 925–953.
- Manyika, J., Chui, M., Brown, B., Bughin, J., Dobbs, R., Roxburgh, C., and Hung Byers, A. (2011). Big Data: the Next Frontier for Innovation, Competition and Productivity. *McKinsey Global Institute*.
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., and Ueda, K. (2016). Cyber-Physical Systems in Manufacturing. *Cirp Annals*, 65(2), 621-641.
- Mortensen, S. T., and Madsen, O. (2018). A Virtual Commissioning Learning Platform. *Procedia Manufacturing*, 23, 93-98.
- Muller, J. M., O. Buliga, and K.-I. Voigt. (2018). Fortune Favors the Prepared: How SMEs Approach Business Model Innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 2–17. doi:10.1016/j.techfore.2017.12.019.
- Nguyen, T., Li, Z. H. O. U., Spiegler, V., Jeromonachou, P., and Lin, Y. (2018). Big Data Analytics in Supply Chain Management: A State-of-the-Art Literature Review. *Computers & Operations Research*, 98, 254–264.
- Pfohl, H. C., Yahsi, B., and Kurnaz, T. (2017). Concept and Diffusion-Factors of Industry 4.0 in the Supply Chain. In *Dynamics in Logistics: Proceedings of the 5th International Conference LDIC*, 2016 Bremen, Germany, 381-390.
- Priego R, Iriondo N, Gangoiti U, and Marcos M. (2017). Agent-Based Middleware Architecture for Reconfigurable Manufacturing Systems. *Int J Adv Manuf Tech*, 92(5–8), 1579–1590.
- Qin, S. J. (2014). Process Data Analytics in the Era of Big Data. *AIChE Journal*, 60(9), 3092-3100.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., and Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. *Boston Consulting Group*, 9(1), 54-89.
- Schniederjans, D. G. (2018). Business Process Innovation on Quality and Supply Chains. *Business Process Management Journal*, 24(3), 635–651. doi:10.1108/BPMJ-04-2016-0088.
- Schuh, G., R. Anderl, J. Gausemeier, M. Ten Hompel, and W. Wahlster. (2017). Industrie 4.0 Maturity Index. In *Managing the Digital Transformation of Companies*. Acatech Study, Herbert Utz. Munich.
- Shen WM, Hao Q, Wang S, Li Y, and Ghenniwa H. (2007), An Agent-Based Service-Oriented Integration Architecture for Collaborative Intelligent Manufacturing. *Robot Com-Int Manuf*, 23(3), 315–325.
- Simpson TW, Jiao JR, Siddique Z, and Hölttä-Otto K, (2014). *Advances in Product Family and Product Platform Design: Methods & Applications*. New York: Springer-Verlag.
- Stock, T., Obenaus, M., Kunz, S., and Kohl, H. (2018). Industry 4.0 as Enabler for A Sustainable Development: A Qualitative Assessment of Its Ecological and Social Potential. *Process Safety and Environmental Protection*, 118, 254-267.
- Taherdoost, H. (2023). An Overview of Trends in Information Systems: Emerging Technologies that Transform the Information Technology Industry. *Cloud Computing and Data Science*, 1-16.
- Tan, Y., Goddard, S., and Perez, L. C. (2008). A prototype architecture for cyber-physical systems. *ACM Sigbed Review*, 5(1), 1-2.
- Thoben, K. D., Wiesner, S., and Wuest, T. (2017). Industrie 4.0 and Smart Manufacturing-A Review of Research Issues and Application Examples. *International Journal of Automation Technology*, 11(1), 4-16.
- Wagire, A. A., R. Joshi, A. P. S. Rathore, and R. Jain. (2020). Development of Maturity Model for Assessing the Implementation of Industry 4.0: learning from Theory and Practice. *Production Planning & Control*, 1–20.
- Wamba, S. F., Akter, S., Edwards, A., Chopin, G., and Gnanzou, D. (2015). How ‘Big Data’ can Make Big Impact: Findings From A Systematic Review and A Longitudinal Case Study. *International journal of production economics*, 165, 234-246.
- Wang YM, Wang YS, and Yang YF. (2010). Understanding the Determinants of RFID Adoption in the Manufacturing Industry. *Technol Forecast Soc*, 77(5), 803–815.
- Wang, G., Gunasekaran, A., Ngai, E. W., and Papadopoulos, T. (2016b). Big Data Analytics in Logistics and Supply Chain Management: Certain Investigations for Research and Applications. *International Journal of Production Economics*, 176, 98-110.

- Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., and Zhang, C. (2016a). Towards Smart Factory for Industry 4.0: A Self-Organized Multi-Agent System With Big Data Based Feedback and Coordination. *Computer Networks*, 101, 158-168.
- Wang, X. V., and Xu, X. W. (2013). An Interoperable Solution for Cloud Manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(4), 232-247.
- Weller, C., Kleer, R., and Piller, F. T. (2015). Economic Implications of 3D Printing: Market Structure Models in Light of Additive Manufacturing Revisited. *International Journal of Production Economics*, 164, 43-56.
- Wided, G., David, C., and Yannick, N., (2009). A Maturity Model for Enterprise Interoperability, On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2009 Workshops. *Lecture Notes in Computer Science*, 5872, 216– 225.
- Willcocks, L. P. (2002). How Radical Was IT-Enabled BPR? Evidence on Financial and Business Impacts. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 14(1), 11–31. doi:10.1023/A:101380 6417513.
- Wu, L., Yue, X., Jin, A., and Yen, D. C. (2016). Smart Supply Chain Management: A Review and Implications for Future Research. *The International Journal of Logistics Management*, 27(2), 395–417.
- Xia, F., Yang, L. T., Wang, L., and Vinel, A. (2012). Internet of Things. *International Journal of Communication Systems*, 25(9), 1101-1102.
- Xu LD, He W, and Li S. (2014). Internet of Things in Industries: A survey. *IEEE Trans Ind Inform*, 10(4), 2233-2243.
- Xu X. (2017). Machine Tool 4.0 For The New Era of Manufacturing. *Int J Adv Manuf Tech*, 92(5–8), 1893–1900.
- Xu, Li Da., Eric L. Xu, and Ling Li. (2018). Industry 4.0: State of the Art and Future Trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941–2962. doi:10.1080/00207543.2018.1444806.
- Xu, X. (2012). From Cloud Computing to Cloud Manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(1), 75-86.
- Yew AWW, Ong SK, and Nee AYC. (2016). Towards A Griddable Distributed Manufacturing System with Augmented Reality Interfaces. *Robot Com-Int Manuf*, 39, 43–55.
- Zhang, G., Yang, Y., and Yang, G. (2023). Smart Supply Chain Management in Industry 4.0: The Review, Research Agenda And Strategies in North America. *Annals of Operations Research*, 322(2), 1075-1117.
- Zhong RY, Huang GQ, Lan S, Dai QY, Chen X, and Zhang T. (2015b). A Big Data Approach for Logistics Trajectory Discovery From RFID-Enabled Production Data. *Int J Prod Econ*, 165, 260–272.
- Zhong RY, Huang GQ, Lan S, Dai QY, Zhang T, v and Xu C. (2015). A Two-Level Advanced Production Planning and Scheduling Model for RFID-Enabled Ubiquitous Manufacturing. *Adv Eng Inform*. 29(4), 799–812.
- Zhong RY, Newman ST, and Huang GQ, Lan S. (2016). Big Data For Supply Chain Management in the Service and Manufacturing Sectors: Challenges, Opportunities and Future Perspectives. *Comput Ind Eng*, 101, 572–91.
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., and Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616-630.
- Zhou, W., Piramuthu, S., Chu, F., and Chu, C. (2017). RFID-Enabled Flexible Warehousing. *Decision Support Systems*, 98, 99-112.
- Zou J, Chang Q, Arinez J, Xiao G, and Lei Y. (2017), Dynamic Production System Diagnosis and Prognosis Using Model-Based Data-Driven Method. *Expert Syst Appl*, 80, 200–209.

---

### Etik, Beyan ve Açıklamalar

---

1. Etik Kurul izni ile ilgili;
    - Bu çalışmanın yazar/yazarları, Etik Kurul İznine gerek olmadığını beyan etmektedir.
  2. Bu çalışmanın yazar/yazarları, araştırma ve yayın etiği ilkelerine uyduklarını kabul etmektedir.
  3. Bu çalışmanın yazar/yazarları kullanmış oldukları resim, şekil, fotoğraf ve benzeri belgelerin kullanımında tüm sorumlulukları kabul etmektedir.
  4. Bu çalışmanın benzerlik raporu bulunmaktadır.
-