



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Endüstri 4.0'da anahtar teknoloji olarak dijital ikizler

## *Digital twins as key technology in Industry 4.0*

Yazar(lar) (Author(s)): Esra KUMAŞ<sup>1</sup>, Serpil EROL<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-3792-1295

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-6885-3849

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kumaş E., Erol S., "Endüstri 4.0'da anahtar teknoloji olarak dijital ikizler", *Politeknik Dergisi*, 24(2): 691-701, (2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.778934

# Endüstri 4.0'da Anahtar Teknoloji Olarak Dijital İkizler

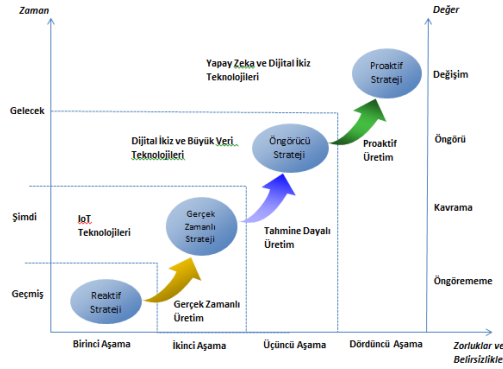
## Digital Twins as Key Technology in Industry 4.0

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Dijital İkiz Kavramsal Modeli/ Conceptual Model for Digital Twin
- ❖ Dijital İkiz Ve Fayda-Maliyet Yaklaşımı (Cost-Benefit Approach for Digital Twin)
- ❖ Dijital İkizler Aracılığıyla Akıllı Üretim (Smart Production Through Digital Twins)

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, üretim süreçlerinde dijital ikiz kavramının kullanılmasıyla birlikte; gerçek zamanlı olmayan verilere dayalı tahmini üretimden, sensör teknolojileri kullanılarak elde edilen gerçek zamanlı verilere dayalı üretime ve nihayetinde proaktif üretime geçiş süreci anlatılmaktadır./In this study, with the use of the digital twin concept in production processes; there is a description about the transformation process from predictive production based on non-real-time data to production based on real-time data that was obtained using sensor technologies. Ultimately proactive production is also described.



Şekil. Geleneksel ve Proaktif Üretim Kontrol Stratejileri /Figure. Control Strategies for Traditional and Proactive Production

### Amaç (Aim)

Bu makalenin amacı; Endüstri 4.0 bağlamında akıllı üretim sistem ve süreçlerinde Dijital İkiz kavramının yeri, önemi ve gelecekteki potansiyelini anlamak, bir referans noktası geliştirmek için literatüre katkı sağlamaktır./ The purpose of this article is contribute to the literature to understand the place, importance and future potential of the Digital Twin concept in smart production systems and processes and also develop a reference point in the context of Industry 4.0.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışma, geleneksel üretimden akıllı üretime uzanan süreçte ürünlerin, süreçlerin ve fabrika yapısının dijitalleşme yolunda hangi aşamalardan geçerek dijital ikiz yapısına kavuştuğunu anlatmaya odaklanmıştır./ In the process that transformed from traditional production to smart production; this study focuses on explaining through which steps the products, processes and factory structure have gained digital twin infrastructure through the way of digitalization.

### Özgünlük (Originality)

Makale, akıllı fabrikalar için dijital ikizlerin kullanımını özetleyen, avantaj ve dezavantajlarını anlatan Türkçe yapılan ilk çalışmadır./ The article is the first study in Turkish literature that summarizes the use of digital twins for smart factories and explains their advantages and disadvantages.

### Bulgular (Findings)

Dijital ikizlerin; geleneksel üretim yöntemlerine nazaran maliyet etkin çözümler sunabildiği ve verimlilik artışı sağladığı açıkça ifade edilebilmektedir./It can be clearly stated in this paper that digital twins can offer cost effective solutions compared to traditional production methods and also provides increased productivity.

### Sonuç (Conclusion)

Dijital ikizler; yüksek güvenlik standartları gerektiren, test ve simülasyon maliyetleri yüksek olan, çok parçalı ve karmaşık ürünlerin üretilmesi ve takibinde işletmeler tarafından büyük faydalar sağlarken basit, az parçalı, test maliyetleri düşük olan ürünler için kullanımı ile ilgili sonuçlar henüz yeterli seviyede değildir./Digital twins concept can provide great benefits for the production and traceability of multi-piece and complex products that require high safety standards, high test and simulation costs. On the other hand; the results of its productivity for simple products and for low test costs aren't sufficient yet.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler etik kurul izni gerektirmemektedir./ There is no need for ethical committee permission for the materials and methods used in this study.

# Endüstri 4.0’da Anahtar Teknoloji Olarak Dijital İkizler

*Derleme Makalesi / Review Article*

**Esra KUMAŞ<sup>1\*</sup>, Serpil EROL<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Bilişim Enstitüsü, Yönetim Bilişim Sistemleri Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 10.08.2020 ; Kabul/Accepted : 03.09.2020)

## ÖZ

Teknolojik icatlar, düşünsel bir geçmiş ile sosyo-ekonomik ve işlevsel bir geleceğin birleşimidirler. Teknoloji alanındaki ilerlemeler ve teknolojik buluşlar sayesinde üretim sürekli gelişmiş ve bu gelişim sürecinde üç büyük devrim görmüştür. Bu devrimlerin gerçekleşmesinin altında yatan teknolojiler üretimin ilerlemesinde katalizör görevi üstlenmişlerdir. Teknolojideki ilerlemeler hızlandığında üretim alanında teknolojik baskılara neden olmuş bu baskılar da devrimlerin gerçekleşmesine yol açmıştır. Siber-fiziksel sistemler, bulut teknolojileri, nesnelerin interneti, büyük veri, sanal gerçeklik, yapay zeka ve 3 boyutlu yazıcı teknolojileri gibi Endüstri 4.0’in bileşeni olarak kabul edilen yeni teknolojiler de endüstriyel bir devrimin gerçekleşmesini sağlayan baskı unsurları olmuştur. Bu teknolojilerin her biri birbirinden bağımsız olarak gelişip farklı uygulama alanlarına sahip olmuş olsa da bir arada kullanıldıklarında elde edilen sinerji sayesinde üretimi, geleneksel yapıdan akıllı üretim seviyesine taşımayı başarmışlardır. Önce sayısallaşan, ardından sanallaşan fiziksel fabrikalar bu sinerjiyle “akıllı fabrikalar”a dönüşmüştür. Fiziksel bir ürünün fikir aşamasındayken başlayan ve ürün ömrü boyunca gerçek zamanlı verilerle sanal bir kopyasının elde edilmesi fikrine dayanan Dijital İkizler, akıllı fabrikaların gerçekleşmesinde bahsi geçen teknolojileri bir arada kullanarak, sinerjiyi ortaya çıkaran anahtar bir teknoloji olmayı başarmıştır. Bu makalenin amacı; Endüstri 4.0 bağlamında akıllı üretim sistem ve süreçlerinde Dijital İkiz kavramının yeri, önemi ve gelecekteki potansiyelini anlamak, bir referans noktası geliştirmek için literatüre katkı sağlamaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Endüstri 4.0, dijital ikiz, akıllı fabrika, nesnelerin interneti.

## Digital Twins as Key Technology in Industry 4.0

### ABSTRACT

Technological inventions are combinations of an intellectual past with socio-economic and functional future. Production is constantly improved thanks to advances in technology and technological innovations and there have been three major revolutions in this development process. The technologies underlying these revolutions have taken the task of catalyst in progress of production. When the progress in technology has accelerated, it was caused technological pressures in production field and it has led to revolutions in these pressure. New technologies, such as cyber-physical systems, cloud technologies, the internet of things, autonomous systems, big data, virtual reality and 3D printer technologies have also become the elements of pressure that they have led to an industrial revolution. Each of these technologies has developed independently and have different application areas but thanks to synergy obtained when used together, they achieved to move production from traditional structure to smarter production level. Physical factories which were firstly became digitized and than secondly virtualized, turned into "smart factories" with this synergy. Starting at the idea stage of a physical product and based on the idea of obtaining a virtual copy with real-time data throughout the life of the product, the Digital Twins managed to become a key technology that brings out synergy by using the technologies mentioned in the realization of smart factories. The purpose of this article is contribute to the literature to understand the place, importance and future potential of the Digital Twin concept in smart production systems and processes and also develop a reference point in the context of Industry 4.0.

**Keywords:** Industry 4.0, digital twin, smart factory, internet of things.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dijital İkiz, iş performansını optimize etmeye yardımcı olan fiziksel bir nesnenin veya sürecin geçmiş ve mevcut davranışının gerçek zamanlı bir dijital profili olarak tanımlanmakta ve büyük, kümülatif, gerçek zamanlı ve gerçek dünyadaki veri ölçümlerine dayanmaktadır. Dijital ikiz teknolojisi Endüstri 4.0’in en önemli bileşeni olan siber fiziksel sistemlerin gerçekleştirilmesi için anahtar bir teknoloji olarak kabul edilmektedir [1]. Fiziksel bir sistemle ilgili dijital bir bilgi yapısının tek başına bir varlık olarak yaratılabileceği fikrine

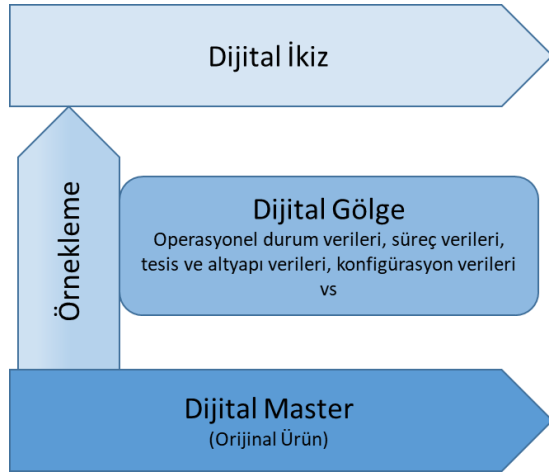
dayanmaktadır. Bu dijital bilgi, fiziksel sistemin içine gömülü olan bilginin “ikizidir” ve sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca bu fiziksel sistemle bağlantılıdır. NASA’nın eşleme teknolojisi sonucunda ortaya çıkan dijital ikiz teknolojisi ilk olarak 2002 yılında Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) merkezinin oluşturulması için Michigan Üniversitesi’nde endüstriye yaptığı sunumda Dr. Michael Grieves tarafından kullanılmış [2] daha sonra 2006 yılında kavramsal modeli sunulmuştur [3]. Kavramsal model, fiziksel bir varlığın tüm veri ve bilgilerinin daha yüksek bir analiz seviyesi için bir araya getirilmesi ihtiyacından ortaya çıkmıştır. NASA’nın Apollo programı içerisinde görev

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : esra.kumas@gazi.edu.tr

sırasında uzay aracının koşullarını yansıtmak için iki özdeş uzay aracı yapılmış, yeryüzünde kalan araca ikiz denilmiştir. İkiz, uçuş hazırlığı sırasında eğitim için yaygın olarak kullanılmıştır. Uçuş görevi sırasında, mevcut uçuş verilerinin uçuş koşullarını olabildiğince kesin bir şekilde yansıtmak ve böylece kritik durumlarda yörüngedeki astronotlara yardımcı olmak için kullanılan dünya tabanlı model de alternatifleri simüle etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu anlamda, gerçek zamanlı davranışın simülasyonu ve gerçek çalışma koşullarını yansıtmak için kullanılan her türlü prototip ikiz olarak görülebilir. Grieves'in kavramsal modeli "Bilgi Yansıtmaya Modeli" olarak adlandırılmış [3], daha sonra 2010 yılında NASA Teknoloji Yol Haritasında "Dijital İkiz" olarak anılmış [4] ve bu şekilde kullanılmaya devam edilmiştir. Dijital ikizin işletmeler tarafından uygun maliyetle erişilebilir kılan ise Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisi olmuştur.

Dijital ikiz kavramı ürünleri, ürün geliştirme süreçlerini ve üretimin tamamının dijital hale getirilmesini hedeflemektedir. Bu anlamda Şekil-1'de belirtilen kavram incelendiğinde; fiziksel ortamdan, dijital ortama geçişte üç aşamalı bir mekanizma çalıştırılmakta olduğu görülmektedir. Orijinal ve fiziksel ürünün özelliklerinin yer aldığı dijital master verisi üzerinden; ürüne ait operasyonel durum verileri, süreç verileri, tesis ve altyapı verileri ile tüm detay verilerin yer aldığı dijital gölge oluşturulmakta ve son olarak bu iki ana katman entegre edilerek dijital ikiz üretilmektedir.



Şekil 1. Dijital İkiz Kavramsal Modeli (Conceptual Model for Digital Twin)

Bir ürün veya sürecin dijital kopyasının oluşturulması ile ilgili düşünceler yeni olmamakla birlikte gerçeğe en yakın dijital bir kopyanın elde edilmesi için gerçekleştirilen çalışmalar bilgisayarların işletmelerde kullanılmasından beri süreklilik göstermiştir. Bilgisayar destekli üretim ve tasarım teknolojileri sayesinde (CAD/CAM), ürün henüz fikir aşamasındayken fiziki olarak modellenilebilirken, simülasyon programları sayesinde ürüne etki eden faktörlerin ürün üzerindeki etkisi test edilebilmiş, sonuçların daha gerçekçi görülebilmesi için sanal gerçeklik (VR) ve uzaktan

kontrollerin gerçekleştirilebilmesi amacıyla da artırılmış gerçeklik (AR) teknolojilerinden faydalanılmıştır. Ancak dijital ikiz teknolojisi dijital kopyaların eş zamanlı izlenmesi, kontrol edilmesi, dahası ürünlere ait gerçek zamanlı ve anlık çevre verilerinin kullanımıyla; anlama, öğrenme ve akıl yürütmeye de olanak sağlayarak kendi kendini yöneten bir ürün olma özellikleriyle sadece dijital bir kopya değil aynı zamanda akıllı fabrikaya giden yolda önemli bir yapı taşı haline gelmiştir.

Bu bağlamda makale, geleneksel üretimden akıllı üretime uzanan süreçte ürünlerin, süreçlerin ve fabrika yapısının dijitalleşme yolunda hangi aşamalardan geçerek dijital ikiz yapısına kavuştuğunu anlatmaya odaklanmıştır. Makalenin giriş bölümünde; dijital ikiz nedir, nasıl ortaya çıkmıştır, nasıl çalışır ve hangi ihtiyaçlara cevap verebilmektedir gibi kavramın analizi yapılırken dijital ikiz ve fayda-maliyet yaklaşımı ile ilgili kısımda; reel sektörde gerçekleştirilen somut uygulamalar ve akademiye yapılan araştırmalara dair verilerle; dijital ikiz kavramının sektöre maliyet etkin bir çözüm getirdiği tespiti yapılmıştır. Geleneksel üretimden akıllı üretime başlığı altında; 20 yüzyılın ikinci yarısından itibaren üretim sektöründe gerçekleşen, iş süreçlerinin karmaşıklaşması ve bu karmaşayı yönetebilmek için geliştirilen teknolojik iyileştirmelerin aşamalı olgunlaşmasına ışık tutulmuştur. Malzeme ihtiyaç planlaması (MRP) ile başlayan, IoT, bulut bilişim, büyük veri, sanal gerçeklik (VR), artırılmış gerçeklik (AR), eklemeli imalat, yapay zeka gibi yeni nesil teknolojilerle üretkenliğin katlandığı ve son olarak bütün bunları barındıran Endüstri 4.0 kavramının taşıyıcısı konumuna evrilen dijital ikiz altyapısının kullanım pratiklerine yer verilmiştir.

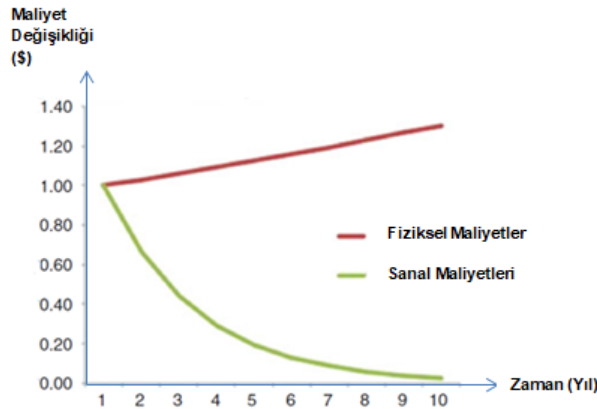
Akıllı fabrika kavramının ilk kez 1980'lerde doğmasına rağmen son dönemde uygulanabilir hale gelmesi bu geçen süreçte akıllı fabrika kurgusunun sanal fabrika yaklaşımlarını ortaya çıkardığına değinilmiştir. Geleneksel fabrikalardan akıllı fabrikalara geçişte yaşanan gelişmelerle birlikte 2004 yılından 2015 yılına kadar geçen zaman diliminde ABD'den, Çin'e Akıllı Fabrika konseptinin uygulamalarının hızla yaygınlaştığının görüldüğü belirtilmiştir. Son 5 yıl içerisinde yapılan akademik ve endüstriyel çalışmalar ışığında, akıllı fabrika kavramının yeni nesil üretim sektöründe maliyet etkin çözümler geliştirmek, kalite ve verimliliği artıran sonuçlar elde etmek, nihayetinde gelir artışı sağlayacak ana itici güç olarak dijital ikiz altyapısıyla ilerleyeceği vurgulanmıştır.

## 2. DİJİTAL İKİZ VE FAYDA-MALİYET YAKLAŞIMI (COST-BENEFIT APPROACH FOR DIGITAL TWIN)

Özellikle havacılık, otomotiv, savunma, sağlık gibi test maliyetlerinin ve hatalı ürün sonuçlarından kaynaklanan maliyetlerin yüksekliği nedeniyle dijital ikiz teknolojisi gerçek zamanlı verilerin kullanılması ve izlenebilirliğiyle önem kazanmaktadır. NASA fiziksel olarak yakınında bulunamadığı araçların sistemlerini çalıştırmak, bakım

ve onarımı sorununu çözmek için geçmişte kullandığı eşleştirme metodunu dijital ikizlere uyarlayarak yeni nesil araçları için uygulamaktadır. 2012'de NASA Araştırma Merkezi tarafından yayınlanan makalede gelecek nesil NASA ve ABD Hava Kuvvetleri araçlarının daha uzun süre boyunca daha yükseğe uçmaları ve daha hafif malzemeden yapılması gerektiği ifade edilmiştir. Bunun için yayınladıkları makalede daha önce kullandıkları tahmine dayalı deney tasarımının yerine geliştirdikleri dijital ikiz çalışmasıyla maliyetlerin azaldığını ortaya koymuşlardır [5]. Çalışmaya göre maliyetleri azaltan 3 neden vardır; birincisi ürün tasarımında optimum sonuca ulaşmak için gerçek verilerin kullanılarak daha kısa zamanda daha doğru sonuca ulaşılmasıdır. İkincisi bir parti içinde çıkan hatalı parça nedeniyle tüm parti ya kontrol edilmekte ya da yeniden üretilmektedir dijital ikiz her parça ve ürünün takip edilebilir olmasıyla sadece hatalı parçaların ayıklanmasını sağlamaktadır. Üçüncü neden ise her parçanın gerçek zamanlı takibiyle parça ve sistemin performansı gözlemlenmekte dolayısıyla bakım süreleri tahmin edilebilmekte ve ürün ömrü uzamaktadır [6].

Fiziksel malzemelerden elde edilen ürün ve buna ilişkin süreçlerin tamamının maliyeti ile dijital ikizin maliyetleri karşılaştırıldığında Grieves ve Vickers'a göre Şekil-2'de görülebileceği üzere üssel bir şekilde fark ortaya konulmuştur.



Şekil 2. Fiziksel ve Sanal Maliyet Karşılaştırması (Cost Comparison for Physical and Virtual) [6]

Benzer şekilde her araç için şasi numarasına ait dijital ikiz oluşturan Tesla, yazılım güncellemeleri sayesinde ürün sürekliliğini sağlamaktadır. 2014 yılında bir modelinde yaşanan güvenlik sorunu nedeniyle ABD Ulusal Otoyol Trafik Güvenliği İdaresi tarafından arabalarının geri çağırılması istenmiştir. Tesla, dijital ikiz ve IoT sayesinde 29222 aracını geri çağırarak yerine yazılım güncellemesiyle sorunu gidermiştir [7]. Bu örnek; dijital ikiz ve sanal ortamda yapılabilecek ürün ve/ya üretim sürecinin simülasyonunun, fiziksel olarak yapılabilecek aktivitelerin maliyetleri arasındaki farkı ortaya koyması bakımından çarpıcıdır. Benzer şekilde General Electric de daha verimli bir rüzgâr türbini inşa etmek ve jet motorlarının ne zaman bakıma ihtiyaç

duyacağını önceden görebilmek için dünya genelinde 1 milyonu aşkın dijital ikizden faydalandığını açıklamıştır [8]. Aynı zamanda bir GE şirketi olan Baker Hughes'in (BHGE) inşa ettiği 3.500 ton ağırlığındaki turbo jeneratörün Batı Kazakistan'a taşınması ve montajını gerçekleştirmek için uzaktan yönetebilecekleri sistemde dijital ikiz teknolojisinden yararlanmışlardır [9].

Son dönemlerde işletme uygulamalarıyla beraber dijital ikizler ile ilgili yapılan akademik çalışmalar da artış göstermiştir. Üretim alanında 2011 yılında, Tuegel vd. bir uzay aracı yapısının ömrünü ve hasarını doğru bir şekilde tahmin etmek için bir dijital ikiz oluşturmaya çalışmışlar 2012 yılında, uçak gövdesinin bakım maliyetini düşürmeyi amaçlayan "uçak gövdesi dijital ikiz" kavramını önermişlerdir [10, 11]. 2013 yılında Reifsnider vd. [12] çok disiplinli fizik tabanlı bir metodolojiyi desteklemek için uçan fiziksel ikizin özelliğini dijital olarak yansıtmayı sağlayacak simülasyon modeli için bir temel oluşturmuştur. 2014 yılında Cerrone vd. [13] daha sezgisel bir örnekle dijital ikizin daha iyi bir tanımını veren, üretilmemiş geometrisini kullanarak her numune için çatlak yolunun doğru bir tahminini uygulamışlardır. 2016 yılında Boschert ve Rosen [14] karmaşık sistemlerin simülasyonunda dijital ikiz uygulama yöntemlerini incelemişlerdir. DebRoy vd. [15] 3D baskı makinelerinin ilk nesil dijital ikizlerini inşa etmek için bir yöntem

önermişlerdir. 2017 yılında, NASA ile ilgili bir sistemde Grieves [6], dijital ikiz teknolojisine dayanan böyle bir sistem için hata tahmini ve ortadan kaldırılması yöntemlerini incelemiş, uygulamış ve test etmiştir. Stark vd. [16] dijital ikizleri yeni nesil üretim sistemleri için yeni bir yaklaşımda test yöntemi olarak benimsemişlerdir. Zhang vd. [17] 2017 de cam üretim hattındaki ürünlerin bireyselleştirilmesi için yinelenmeli optimizasyon tekniği kullanarak bir dijital ikiz simülasyon modeli önermişlerdir. Tavares vd. [18] 2017'de farklı endüstriyel ortamlardaki iş akışlarına uygulanma esnekliğine sahip simülasyon geliştirmişlerdir.

Gartner [19] tarafından 2017 yılında yayımlanan ve Çin, ABD, Almanya ve Japonya'dan 202 firmanın dahil

olduğu veriler üzerinden üretilen; “Prepare for the Impact of Digital Twins” araştırma raporuna göre işletmelerin %23’ü dijital ikiz kavramını kullanmaya başlamış, %23’ü henüz dijital ikiz kavramını kullanmıyor ama planlıyor, %19’u henüz dijital ikiz kavramını kullanmıyor ama önümüzdeki 3 yıl içerisinde planlıyor, %20’si ise kullanmayı planlamıyor şeklinde sonuçlar paylaşılmıştır. Aynı raporda Gartner sektör uzmanları büyük ölçekli işletmelerin %50’sinin “operasyonel süreçlerinde en az %10’luk bir iyileştirme gerçekleştireceklerini düşündükleri için” dijital ikiz kavramının hayata geçirileceğini öngörmektedirler.

Dolayısıyla; dijital ikiz kavramının endüstrinin farklı sektörlerinde uygulanmaya başlandığı ve geleneksel üretim yöntemlerine nazaran maliyet etkin çözümler sunabildiği, verimlilik artışı sağladığı açıkça ifade edilebilmektedir. Nitekim dijital ikizler; fiziksel ürüne ait üretim süreçlerinde, üründe oluşabilecek hataların tespiti daha ürün ortaya çıkmadan tasarım aşamasında yakalanabilmekte, ürünün mühendislik maliyetlerini azami ölçüde aşağıya çekebilmektedir.

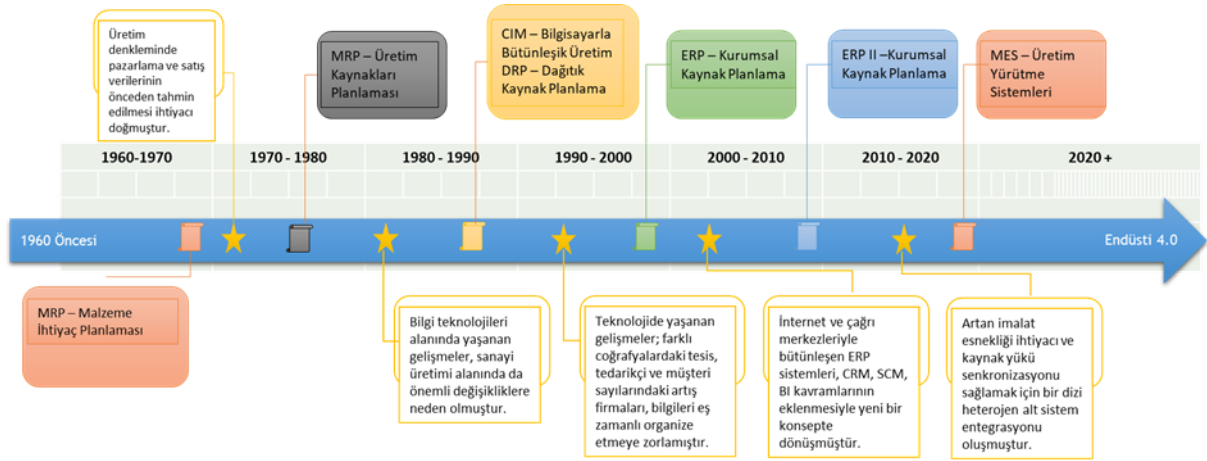
## 1. GELENEKSEL ÜRETİMDEN AKILLI ÜRETİME (FROM TRADITIONAL PRODUCTION TO SMART PRODUCTION)

Alan Mathison Turing [20] 1950 yılında kaleme aldığı “Computing Machinery and Intelligence” isimli makalesinde, “Makineler düşünebilir mi” sorusu üzerine düşünmek ve bu işe “makine” ve “düşünmek” kelimelerinin terim anlamlarıyla başlamak gerektiğini söylediğinde bilgisayarlar henüz vakum tüplü yani birinci kuşak dönemindeydi. Ne vakum tüplü bilgisayarlar, ne ikinci kuşak transistörlü bilgisayarlar, ne de onlardan sonra gelecek entegre devreli üçüncü kuşak bilgisayarlar Turing’in makinelerle düşünme özelliği kazandırılabilir mi sorusuna cevap verebilecek nitelikte değildi. Ancak 1970 sonrasında geliştirilen mikroşemcili dördüncü kuşak bilgisayarlar, bilgisayar bilimini geleneksel veri işleme ve yapay zeka olarak iki temel disipline ayırma olanağı sağlayacaktı.

1960’lı yılların sonuna doğru imalatın hızlı bir şekilde gelişmesi ve ekonominin büyümesiyle artan talep, seri üretim uygulamalarıyla birlikte hammadde ve malzeme tedarikinde sorunların yaşanmasına neden olmuştur. Bu tarihlerde bilgisayarların işletmelerde kullanılmasıyla birlikte ilk kez Malzeme İhtiyaç Planlaması (MRP) sistemi de kullanılmaya başlanmıştır. Böylece üretilen ürünlere ait parça bilgisi ve bu parçalar için gerekli hammadde ve malzeme tedarikine ait verilerin sayısallaştırılması sayesinde envanter tutma maliyetleri ve temin süreleri azaltılmıştır. Zamanla fabrika kapasitesi de modüle dahil edilmiş ancak bu dönemde küreselleşmenin etkisiyle talebin artık müşteri tarafından belirlenmesinden dolayı stoğa değil siparişe göre üretimin ağırlık kazanmasına yol açmıştır. Bu durum bir taraftan ürün çeşidi artarken parti büyüklüklerinin ve çevrim sürelerinin azalmasına, üretim içindeki yapının daha karmaşık hale gelmesine yol açarken diğer yandan

üretim denkleminde pazarlama ve satış verilerinin önceden tahmin edilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bu denk-emin sağlanmasında MRP yetersiz kalınca 1980’lerde Üretim Kaynakları Planlaması yaklaşımı ortaya çıkmıştır [21]. Üretim Kaynakları Planlaması sayesinde üretim, planlama, satış, finans, stok, pazarlama, lojistik, mühendislik fonksiyonlarına ait veriler ortak bir veritabanı tarafından yönetilmeye başlanmıştır.

Teknoloji ve bilişim alanında yaşanan hızlı gelişmeler sanayi üretimi ve gelişimi alanında da Şekil-3’te takip edilebileceği üzere önemli değişikliklere neden olmuştur. Endüstriyel gelişmeler ve gereksinimler; aşamalı olgunlaşma modeliyle ilerlemiş, sektörün bağımsız olarak teknolojik imkanların sunduğu verimlilik artırıcı sistemlerle entegre edildiği görülmüştür. Bilgi ve iletişim, organizasyon ve lojistik alanındaki yeni araçlar modern iş dünyasında yeni üretim teknikleri ve yeni iş modellerinin gelişmesine ve beraberinde üretim sektöründeki hizmet faaliyetlerinde iyileşme sağlayan bir sistem uygulanmasına yol açmıştır. Bu gelişmelerle birlikte pazardaki değişiklikler, klasik üretim yöntemlerinin terk edilmesine ve yeni gereksinimlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Böyle bir rekabet, üretim maliyetlerini düşüren, üretim döngüsünü kısaltan, ürün kalitesini artıran Bilgisayarla Bütünleşik İşletme, Bilgisayarla Bütünleşik İmalat, Fabrika Otomasyonu ve Tam Zamanında kavramlarıyla üretim sistemlerinin teknik ve organizasyonel olarak yeniden yapılandırılmasını sağlamıştır [22]. Bu süreçte ürün geliştirme ile üretim sürecini bütünleştiren Bilgisayarla Bütünleşik Üretim (Computer Integrated Manufacturing, CIM) sistemleri ve firmaların ürün dağıtım kanallarını yönetmelerini sağlayan Dağıtım Kaynakları Planlama (Distribution Resource Planning, DRP) sistemleri ortaya çıkmıştır. CIM, üretim için önemli bir araç olsa da işletmeleri, planlama ve operasyonlardaki aşırı karmaşıklığın zorluklarıyla boğuşmaktan kurtaramamıştır [23]. Ancak teknolojiye son yirmi yılda yaşanan değişimler tarihte hiç olmadığı kadar hızlı gelişme göstermiştir ve üretim yöntem ve araçları da bu değişimlerden etkilenecek sürekli olarak gelişim göstermiştir. Hozdić [22]’e göre; teknolojik evrimin özünde zaman ve mekanın sıkıştırılması söz konusudur ve teknolojiye yaşanan tüm gelişmeler küresel iletişim için gereken mesafeyi ve zamanı azaltmış böylelikle işletmelerin farklı ülkelerde tesislere, tedarikçilere ve müşterilere sahip olmasının önünü açmıştır. Farklı coğrafyalardaki tesis, tedarikçi ve müşteri sayılarındaki artış firmaları bilgileri eş zamanlı organize etmeye zorlamış ve bir kurumda süregelen tüm bilgi akışının bütünleşmesini sağlayan Kurumsal Kaynak Planlama (Enterprise Resource Planning, ERP) sisteminin geliştirilmesine [24], hizmet ve üretim firmalarının tüm süreçlerini entegre bir biçimde yönetmesine olanak sağlamıştır. Henüz işletmelerin internetle tanışmadığı 80’lerde MRP, ana sunucu bilgisayarlar için tasarlanırken, internet (TCP/IP) tabanlı türevlerin oluşmaya başlamasıyla birlikte ERP yazılımları istemci-sunucu mimarisine geçmiştir [25].



Şekil 3. Geleneksel Üretim ve Sistemlerin Evrimi (Evolution of Traditional Production and Systems)

İnternet ve çağrı merkezleriyle bütünleşen ERP sistemleri, Müşteri İlişkileri Yönetimi (Customer Relationship Management- CRM), Tedarik Zinciri Yönetimi (Supply Chain Management- SCM) ve İş Zekası (Business Intelligence - BI) kavramlarının da eklenmesiyle ERP II konseptine evrilmiştir.

Son yıllarda imalat mühendisliği, farklı disiplinlerdeki gelişmeler nedeniyle hiç olmadığı kadar büyük değişiklikler yaşamıştır. Gelişmiş dünya pazarı her dönemde gitgide daha çok ürün çeşidinin artmasına, ürün yaşam sürelerinin kısalmasına ve yeni ürünlerin ortaya çıkmasına, yüksek kalite standartlarına, son derece kişiselleştirilmiş ürünlerin üretilmesine, kısa teslimat ve azalan maliyetlere, üretimin çevresiyle daha sıkı ilişkilerin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu tür koşullar bugün sahip olduğumuz klasik endüstriyel üretim için çok zordur ve iletişim ağları ve internet gibi modern teknolojik ilerlemeler sayesinde, iletişim temelli yeni bir endüstriyel üretim çağını geliştirmeyi zorunlu kılmıştır. Üretim planlama periyotlarındaki ve ürün yaşam döngülerindeki sürelerin kısalması parti boyutlarının azalmasına neden olmaktadır bu da üretim esnekliğini artırmayı zorunlu kılmıştır. Üst yönetimin doğru kararlar alabilmeleri için, bilgiye gerçek zamanlı olarak ulaşmak ve alınan kararların doğrudan uygulanması gerekmektedir. İşletmelerin makine arızası veya piyasadaki sipariş dalgalanması gibi maruz kaldığı (iç veya dış) çok sayıda türbülans, fabrikada dinamik değişikliklere yol açmaktadır. Ancak fabrikanın farklı fonksiyonlarının ve bölümlerinin karmaşık etkileşimleri ve görev odaklı spesifik veri formatları nedeniyle böylesi durumlar farklı planlama düzeylerinde yanlış kararlara yol açabilmektedir [26].

Fabrika içindeki ve dışındaki karmaşık süreçlerin yönetim kontrolü ERP ve Üretim Yürütme Sistemleri (MES) ve uygulamaları aracılığıyla yapılırsa da artan piyasa türbülansları ve dolayısıyla artan imalat esnekliği, günümüzün çözümleriyle gerçekleştirilmesi zor olan karmaşık imalat süreçlerine yol açmaktadır. Farklı bilgi sistemlerindeki eski bilgiler planlama ve üretim sorunlarına neden olmaktadır. Gerekli tüm kaynakları, malzemeleri ve bilgileri sağlayan birçok heterojen alt

sistemin koordinasyonu, sabit bir kaynak yükü sağlamak için gerekli olan senkronizasyonu geliştirmek amacıyla MES veya gelişmiş ERP sistemleri

gibi birçok farklı özel yazılım uygulaması kullanılsa da alt sistemdeki herhangi bir arıza, tüm sistemin verimliliğinde önemli bir düşüşe neden olmaktadır. Gerçek ve kaydedilmiş dijital veriler arasındaki en küçük fark bile planlama tutarsızlıklarına ve optimum verimlilik noktasının yanlış hesaplanmasına yol açmaktadır [27]. Gerçek zamanlı verilerin ana akım üretim süreçleri içerisinde senkronize bir şekilde değerlendirilememesi nedeniyle bahsi geçen hesap hataları, üretime yön veren algoritmaların farklı sonuçlar üretmesine sebep olabilmekte ve işletme karlılığını, verimliliğini ve müşteri memnuniyetini azaltabilmektedir. Endüstri 4.0 kavramının üretim ve yönetim süreçlerinde yaratmakta olduğu paradigma değişimiyle birlikte; anlık veri toplayabilmesi, toplanan verileri işleyebilmesi ve anlamlı bilgilere dönüştürerek üretim ve yönetim karar mekanizmalarına girdi sağlayabilmesi mümkün hale gelmektedir. İşletme içerisinde her geçen gün bir taraftan işletme kaynakları sayısallaşmakta diğer yandan işletme içi birimleri birbirine bağlayan dijital araçlar gelişmekte olsa da Endüstri 4.0'ı işletmeler açısından güçlü kılan en önemli nokta gerçek zamanlı ve kesintisiz verilere dayanarak oluşturulan entegrasyon teknolojisidir.

## 2.1. Üretim ve Yönetim Süreçlerinde Esneklik Artışı ve Nesnelere İnterneti (Increased Flexibility in Production and Management Processes and Internet of Things)

Mikroçipler veya sensörler gibi elektronik bileşenlerin fiyat düşüşleri nedeniyle nesnelere entegrasyonu ile paralel bir gelişme sağlanmıştır. Bu gelişme MES ya da ERP gibi merkezi bir kontrol sağlamak yerine daha dinamik bir kontrolü daha ekonomik bir şekilde yapmayı mümkün kılmaktadır. 1999 yılında Kevin Ashton tarafından çevreyi algılayabilen ve iletişim kurabilen nesnelere anlatmak için ortaya konulan "Nesnelere İnterneti (IoT)" kavramı [28] ile artan karmaşıklığı anlayıp ona hızlı bir şekilde yanıt verebilen sistemin kurulabilmesinin önü açılmıştır. Nesnelere kodlama ve

izleme yeteneği, şirketlerin daha verimli olmalarını, süreçleri hızlandırmalarını, hatayı azaltmalarını, kayıpları önlemeyi ve IoT aracılığıyla karmaşık ve esnek organizasyon sistemlerini kullanmalarını sağlamıştır [29]. IoT; insandan insana, insandan nesneye ve nesneden nesneye iletişim sağlayan, otomatik düzenleme, bilgi, veri ve kaynakları paylaşma, ortamdaki durumlara ve değişikliklere karşı tepki verme ve hareket etme kapasitesine sahip açık ve kapsamlı akıllı bir küresel nesnelere ağı ifade etmektedir [30].

IoT, bütünlük bir küresel ağ üzerinde her şeyi herkesle birbirine bağlayabilecektir. İnsanlar, makineler, doğal kaynaklar, üretim hatları, lojistik ağları, geri dönüşüm süreçleri gibi ekonomik ve sosyal hayatın her noktası sensörler ve yazılımlar marifetiyle IOT platformlarına bağlanabilecektir [31]. Dünyanın önde gelen bilgi ve iletişim teknolojileri şirketleri, IoT altyapısı konusunda çalışmalar yürütmekte, General Elektrik'in "Endüstriyel İnternet", Cisco'nun "Her şeyin İnterneti", IBM'in "Daha Akıllı Bir Gezegen" ve Siemens'in farklı isimlendirmeleriyle şekillendirdikleri "Küresel Bir Sınır Ağı" bağlamında yeni bir ekosistem inşası devam etmektedir.

IoT, bulut bilişim, büyük veri, sanal gerçeklik, eklemeli imalat, mobil internet ve yapay zeka (AI) gibi yeni nesil bilgi ve iletişim teknolojilerinin hızla gelişmesi nedeniyle, atölye üretim yönetimi ve kontrol önemli bir değişim geçirmektedir. Bu arada, entegrasyon kapsamı da yavaş yavaş içten dışa doğru kaymakta ve tedarik zinciri işletmeleri arasında işbirliğine dayalı üretim yönetimi ve kontrolünü gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır [1].

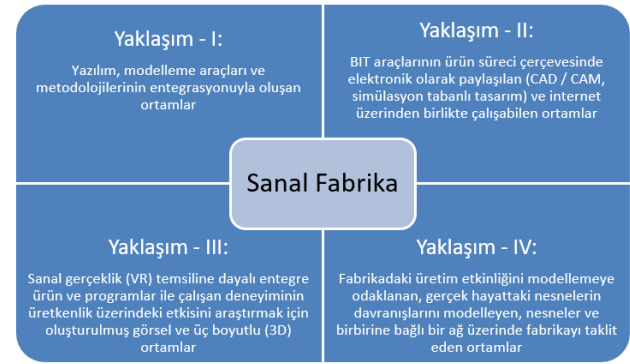
Mark Weiser, 1993 yılında kaleme aldığı "Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing" adlı makalesinde günlük hayatta kullandığımız nesnelere sensörlerin, aktüatörlerin, ekranların ve bilgisayar elemanlarının sorunsuz bir şekilde yerleştirildiği her yerde ve her zaman erişim olarak ifade ettiği "akıllı ortamlar" vizyonunu dile getirmiştir [32]. Mark Weiser'ın akıllı ortamlar yaklaşımının IoT sayesinde üretime aktarılmasıyla sayısal ve sanal fabrikalardan sonra fabrikaların evriminde bir sonraki adım olan fiziksel ve sanal dünyanın kaynaştırıldığı "Akıllı Fabrika" gerçekleştirilmiştir [33].

## 2.2. Sanal Fabrika ve Dijital İkiz Kavramı (Virtual Factory and Digital Twin Concept)

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler işletmelere sadece yönetsel kararlar için dijital veriler oluşturmalarına izin vermekle kalmamış aynı zamanda üretimin ve süreçlerin dijitalleşmesine de olanak sağlamıştır. 1970'lerde Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) ve Bilgisayar Destekli İmalat (CAM) uygulamalarındaki gelişmeler Bilgisayarla Bütünleşik İmalat (CIM) kavramının ortaya çıkmasını sağlamıştır. CIM kavramı ilk olarak 1973 yılında Dr. Joseph Harrington tarafından önerilmiş, 1983 yılında Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri Entegre Bilgisayar Destekli İmalat (ICAM) programını başlatmış, 1997 yılına gelindiğinde

ise küresel piyasa ve çevre koşullarını karşılamak için sanal bir CIM ihtiyacını sağlayacak şekilde, Güney Avustralya Üniversitesi İleri İmalat Araştırma Merkezi (CAMR) tarafından yeni bir CIM geliştirilmiştir. Günümüzde endüstrinin birçok alanında sanal işletmelerin sayısı sürekli artmakta Siemens Otomasyon ve Sürücüler grubu, bilgisayar tabanlı otomasyon çözümleri yapan şirketlerin sayısının her yıl %20 artacağını tahmin etmektedir [34].

Bir yandan ürünün sanal ortamda tasarlanıp üretilmesini sağlayan CIM uygulamaları, diğer yandan üretim gerçekleştirmeden testlerinin gerçekleştirildiği simülasyon programları, internet bağlantısı sayesinde bilgi paylaşımına dayalı dijitalleşme, ürünlerin ve üretim merkezlerinin 3 boyutlu tasarımını mümkün kılan teknolojiler sanal fabrikaların gerçekleşmesine olanak sağlamıştır.



Şekil 4. Sanal Fabrika Yaklaşımları (Virtual Factory Approaches)

Sanal fabrika kavramı 1990'ların sonlarında tartışılmaya başlanmış ve Jain vd. sanal fabrikalar ile ilgili yaklaşımları Şekil-4'te görselden de takip edilebileceği üzere 4 farklı grupta toplamıştır [35];

- I. Üretim alanındaki çeşitli sorunlara yönelik çözümleri desteklemek için çeşitli yazılım, modelleme araçları ve metodolojilerinin entegrasyonu için bir metafor olarak sanal fabrika [36],
- II. Birkaç ortağın elektronik ortamda bilgi ve iletişim araçlarını bir ürün süreci veya projesi etrafında elektronik olarak paylaştığı (CAD/CAM, simülasyon tabanlı tasarım) işbirlikçi, internet üzerinden çalışan ortamlar olarak sanal fabrika [37],
- III. Sanal gerçeklik temsiline dayalı çeşitli ürün karışımlarının, denetim programlarının ve işçi deneyiminin üretkenlik üzerindeki etkisini araştırmak için görsel, üç boyutlu bir alan sağlayan sanal fabrikalar [38],
- IV. Bir fabrikadaki üretim etkinliğini modellemeye odaklanan, gerçek hayattaki nesnelere davranışlarını modelleyen, nesnelere ağına bağlı bir bilgisayar ortamında bir fabrikayı taklit eden sanal ortamlar [39].



Ürün veya süreçler için geliştirilen simülasyon modellerinde sensörlerden gelen verilerin kullanımı, sonuçların gerçeğe yakınlığını ve kesinliğini artırmaktadır [40]. 1970'li yıllarda Jaron Lanier tarafından kavramsallaştırılan sanal gerçeklik (VR) kavramı genel olarak bilgisayar yazılım ve donanımları tarafından üretilen üç boyutlu (3D) bir dünya olarak tanımlanmaktadır [41] ve gerçek hayatta karmaşık durumları ve bağlamları simüle eden ve insan-makine iletişimini artırmak için geliştirilen bir çoklu ortamdır [42]. Sanal gerçekliğe ait ilk çalışmalar 1980'lerde NASA (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi) tarafından robotların kullanıldığı bir uzay ortamında insan yetenekleri gerektiren bir onarım sorununun çözümünde uzaydaki robot ile astronotun senkronize hareket etmelerini sağlayan bir sistemin geliştirilmesiyle ortaya çıkmıştır [43]. Sanal gerçekliğin temel özelliği, gerçek zamanlı etkileşimdir. Sanal gerçeklik sistemleri genellikle elde taşınan nesnelerin ve kullanıcının baş ve uzuvlarının hareketini izler ve alınan veriler, kullanıcının "avatar" olarak bilinen sanal görünümünün gezinmesini, nesnelerle etkileşimini ve olası sanal hareketini belirlemek için kullanılmaktadır [44].

Artırılmış gerçeklik (AR) ise gerçek dünyaya bilgisayar tarafından üretilen ses, video, grafik, konum bilgisi gibi verilerin entegre edilmesiyle normal koşullarda insanların duyuları ve bilişsel süreçleri tarafından saptanabilir olmayan bilgilerin sağlanarak, gerçek dünya ile sanal imgelerin birleştiği, gerçek ve sanal nesneler arasında eş zamanlı etkileşimin gerçekleştiği bir teknolojidir [45].

Ürünlerin ve üretim sistemlerinin gerçek zamanlı olarak kontrol edilmesi ve optimizasyonunu sağlamak amacıyla simülasyon kullanımında ise dijital ikizler, sanal fabrika evriminde son adım olarak kabul edilmektedir. Adını NASA tarafından yürütülmüş olan Apollo programından alan dijital ikizler, fiziksel ve sanal dünyalar arasında kesintisiz veri aktarımı sağlayan üretimdeki varlıkların dijital bir kopyası olarak tanımlanmaktadır. Dijital ikiz cihazlar, üretim ortamının geliştirilmesi, test edilmesi, iyileştirilmesi ve yükseltilmesi için bir platform sunmaktadır. Dijital ikiz teknolojisi fabrika, ürün ve süreçlerin geliştirilmesinde öngörüden kaynaklanabilecek sorunlar yerine ürün veya sürecin gerçek zamanlı performans verileri, sensör verileri, muayene verileri, yapılan bakımların tarihçesi, konfigürasyon değişiklikleri, parça değişimi ve garanti verilerinin izlenmesini sağlar. Böylelikle ürün veya sistemin performansını ve kullanım ömrünü tahmin edebilmekte, kendi kendini iyileştirme mekanizmalarını kullanarak ortaya çıkabilecek hasarları azaltmaktadır [5]. Dijital ikiz; fiziksel bir nesnenin ve/ya operasyonel sürecin sanal bir görüntüsüdür ve bu görüntüde ürün ve sistemin içinde bulunduğu çevre, gerçek verilere göre izlenebilmektedir. Böylece ürün ve operasyonel süreçte etki eden tüm faktörler öngörüye göre değil gerçek faktör ve değerlere göre gözlenebilmekte ve etkileri ölçülebilmektedir. Gerçek zamanlı izleme ve takip yetisinin kazanılması; ürün tasarımından kaynaklanan

hata miktarlarını önemli ölçüde azaltır ve verimlilik artışı sağlamaktadır. Bir anlamda sanal fabrika ve dijital ikiz kavramlarının birbirini destekleyen, geliştiren ve akıllı katan aşamalı olgunlaşma süreci, geleneksel fabrikaların akıllı fabrikalara evrilmesine de yol açabilecektir.

### 2.3. Akıllı Fabrika ve Dijital İkiz Kavramı (Smart Factory and Digital Twin Concept)

Akıllı fabrika, karmaşıklığı artan bir dünyada dinamik ve hızla değişen sınır koşulları ile bir üretim tesisinde ortaya çıkan sorunları çözecek esnek ve uyarlanabilir üretim süreçleri sağlayan bir üretim çözümüdür. Bu özel çözüm, bir yandan, gereksiz işçilik ve kaynak israfını azaltmakla sonuçlanan üretim optimizasyonuna yol açması gereken yazılım, donanım ve/veya mekânın bir kombinasyonu olarak anlaşılan otomasyonla ilgilidir.

Akıllı fabrika kavramı 1980'lerde doğmasına rağmen ilk kez 2004 yılında Almanya'da üretici ve kullanıcı temsilcileri akademiden insanlarla bir araya gelerek geleceğin akıllı fabrikası için bir vizyon geliştirerek dünyadaki akıllı üretim teknolojileri için ilk tesis olan SmartFactoryKL'nin temelini attılar [23]. Akıllı üretim için atılan bu temelden sonra asıl ilgi ise 2010'dan sonra görülmeye başlamıştır. 2011 yılında ABD'de Akıllı Üretim Liderlik Koalisyonu kurulmuş ardından akıllı üretim için bir eylem planı ile birlikte "endüstriyel internet" kavramı önerilmiştir. ABD hükümeti ayrıca imalat sanayinde bir başka küresel öncü olarak siber-fiziksel sistemler (CPS) terimini tanımlamıştır. CPS fiziksel, hesaplama ve ağ iletişimi ve iletişim süreçlerini birleştiren karmaşık bir mühendislik sistemidir. CPS, sanal bir model olarak siber uzaya çevrilen fiziksel bir aygıt, nesne, ekipman olarak gösterilebilir. Siber-fiziksel sistemler ABD ve Avrupa Araştırma Konseyinin ulusal araştırma önceliği haline gelmiştir. Ardından ABD hükümeti önce Ohio'da eklemeli imalat, Kuzey Carolina'da düşük güçlü yarı iletken üretimi, dijital üretim ve tasarım yeniliği (DMDI) ve Michigan'da hafif malzemeler de dahil olmak üzere dört üretim merkezi kurmuştur [46]. 2013 yılında Alman Federal Eğitim Bakanlığı ve Federal Ekonomi ve Teknoloji Bakanlığı yepyeni bir "Endüstri 4.0" konsepti ortaya koymuştur. Siber fiziksel sistemlerin (CPS) tam kullanımı yoluyla imalat sanayini akıllı aşamaya getirmeye çalışmıştır. 2015 yılında Çin hükümeti ise, "Made in China 2025" adlı iddialı bir plan yayınlamıştır.

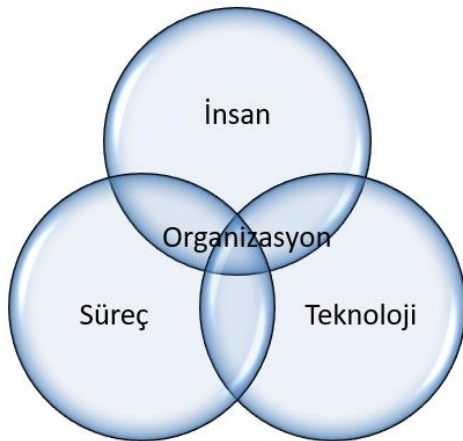
Akıllı fabrikaların stratejik önemi artık kaçınılmaz olarak karşımızda durmaktadır. Çünkü teknolojinin getirdiği imkanlar erken benimsendiğinde, daha verimli çıktılar elde edildiği ve kârlılığın arttığı görülebilmektedir. Teknolojinin itici gücü, üretim süreçlerinin tamamında geçmiş dönemlerde olduğu gibi değişimi kaçınılmaz kılmaktadır. Deloitte tarafından 2019 yılında gerçekleştirilen bir araştırmaya göre; sadece ABD'de, üreticilerin yüzde 86'sı akıllı fabrikaların 2025 yılına kadar rekabetin ana itici gücü olacağına inanmaktadır. Ayrıca yüzde 83'ü akıllı fabrikaların ürünlerin üretilme biçimini değiştireceğini öngörmektedir [47]. Araştırma, nesnelerin endüstriyel interneti (IIoT), bulut ve yüksek

teknolojiler, robotik süreç otomasyonu (RPA), yapay zeka, makine öğrenmeleri, görüntü işleme sistemleri, artırılmış ve sanal gerçeklik ve diğerleri arasındaki yeteneklerini birleştiren akıllı fabrika teknolojilerinin konuşlandırılması yoluyla maliyet, verim, kalite, güvenlik ve gelir artışındaki gelişmeyi ortaya koymaktadır.

Geleneksel üretimin aksine; akıllı iş ekipmanları, üretim süreçlerini kontrol eder ve izler. Akıllı fabrika ortamında; üretim sistemleri ve lojistik sistemleri herhangi bir insan müdahalesine gerek duymaksızın büyük ölçüde kendi kendilerini yönetebilirler. Akıllı fabrikalar; aslında sanal ve fiziksel dünyayı teknoloji altyapısı sayesinde ve IoT marifetiyle yönetmeye dayanmaktadır. Yukarıdaki bölümlerde bahsi geçen dijital ikiz kavramı da aslında Endüstri 4.0 yaklaşımını gerçekleştirilmesine olanak tanıyan bir araç olarak değerlendirilmelidir.

Bu yönüyle Endüstri 4.0 yaklaşımı; akıllı bilgi toplama, depolama ve bilgiyi yöneterek dijital modelleme süreçlerine dahil olmayı gerektirmektedir. Böylelikle; akıllı fabrikalarda bilgi yönetimi daha doğru ve kaynaklar daha verimli kullanılabilir hale gelmektedir [48].

Bu verimliliğin sağlanabilmesi için; Şekil-5'te görseli bulunan, üretim süreçleri, bilgi sistemleri ve insanlar arasında kurgulanmış çapraz-kurumsal işbirliğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bahsi geçen bu entegrasyonların; oluşan bilgiyi analiz edebilme ve proses edebilmeleri sayesinde anlamlı karar destek modellerine dönüştürme gibi bir amacı da bulunmaktadır. Bir işletme ve/ya fabrika bünyesinde insan, süreç ve teknoloji sacayağının üzerinde kurgulanmış iyi bir organizasyonel yapılanma olduğunda, entegre ve koordineli bir şekilde çalıştığında üretkenlik kaçınılmaz olarak artacaktır. Bu noktada; bahsi geçen üretkenliğin artmasını sağlayacak olan; entegrasyon, koordinasyon ve teknolojiyi eşgüdüm halinde kullanabilecek alan Endüstri 4.0 ve onun önemli bir aracı olan dijital ikiz ile mümkün olacaktır.



Şekil 5: İşletmelerin Temel Unsurları (Key Elements for Companies)

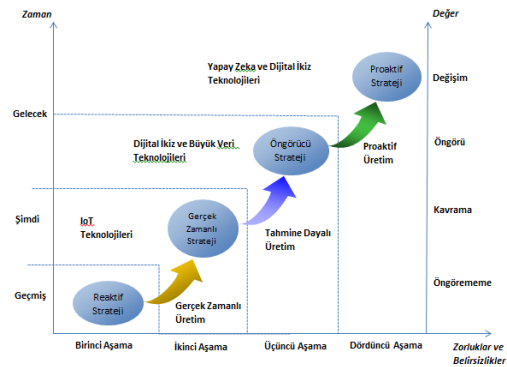
Akıllı fabrikalar; bünyesinde “zeka” barındıran bir kavram olup, üretim sistemlerinin mevcut teknoloji

altyapısı sayesinde birbirleriyle iletişim halinde ilerleyebilen ve akıllı ürün üretilmesini sağlayan bir pratiktir. Akıllı fabrikalar; kuruluşa ait değer zincirinin tamamında ve spesifik olarak da üretim ve yönetim sistemleri özelinde dijitalleşmenin en yoğun kullanıma sahip olduğu, kendi kendini yönetebilen ve entegre süreçlerden ibarettir. Temel amacı ise verimli bilgi paylaşımı ve kaynak kullanımının senkronize bir şekilde üretim ve yönetim sistemleri, çalışanlar ve bilgi sistemleri arasında sağlanabilmesine olanak tanımadır.

### 3. DİJİTAL İKİZLER ARACILIĞIYLA AKILLI ÜRETİM (SMART PRODUCTION THROUGH DIGITAL TWINS )

IoT, bulut bilişim, büyük veri, sanal gerçeklik, eklemeli imalat, mobil internet ve yapay zeka (AI) gibi yeni nesil bilgi ve iletişim teknolojilerinin hızla gelişmesi nedeniyle, geleneksel üretim yönetimi ve kontrolü önemli bir değişim geçirmektedir. Entegrasyon kapsamı da yavaş yavaş içten dışa doğru kaymakta ve tedarik zinciri işletmeleri arasında işbirliğine dayalı üretim yönetimi ve kontrolünü gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır [1].

Akıllı üretim mekanizmalarının geliştirilmesi ve endüstriyel değişim sürecinin geldiğimiz son teknolojik noktası genel olarak Endüstri 4.0 olarak kavramsallaştırılırken, özelde dijital ikiz olarak kullanılabilmektedir. 2017 yılında Yao [49-50], verilerin kullanım derecesine ve araştırma derinliğine göre “proaktif imalat” adı verilen yeni bir üretim paradigması önermiştir ve imalat paradigmasının “geleneksel” pasif imalattan (reaktif olarak da bilinir) gelişeceğine dikkat çekmiştir. Üretim süreçlerinde dijital ikiz kavramının kullanılmasıyla birlikte; gerçek zamanlı olmayan verilere dayalı tahmini üretimden, sensör teknolojileri kullanılarak elde edilen gerçek zamanlı verilere dayalı üretime ve nihayetinde proaktif üretime geçiş yapılmaktadır. Geleneksel üretim yönetimi ve proaktif üretim ile ilgili kontrol stratejileri Şekil- 6’da görülebileceği üzere gelişim ve değişimi görülebilmektedir.



Şekil 6: Geleneksel ve Proaktif Üretim Kontrol Stratejileri (Control Strategies for Traditional and Proactive Production) [51]

Şekil-6'da geçmiş dönemde uygulanan üretim kontrol stratejileriyle ilgili geçişler, reaktif üretim stratejileri, gerçek zamanlı stratejiler, öngörücü stratejiler ve proaktif üretim stratejileri şeklinde ifade edilmiştir.

- Birinci aşama; Reaktif yönetim ve kontrol stratejileri çerçevesinde verilerin çoğu evrak veya çevrimdışı manuel giriş yoluyla toplanmaktadır. Veri miktarı fazla değildir ve geleneksel ilişkisel veritabanlarında depolama, organizasyon ve yönetim gereksinimlerinin çoğunu karşılayabilmektedir. Veri gerçek zamanlı olmadığından, veri işleme ve analizi her zaman gecikmektedir. Üretim süreçleri ve süreç kontrolleri geçmiş verilere dayanmaktadır.
- İkinci aşama: Gerçek zamanlı yönetim ve kontrol stratejileri çerçevesinde IoT teknolojisinin endüstriyel alanda derinlemesine uygulanmasıyla montaj süreçleri, radyo frekanslar aracılığıyla üretim kaynaklarının algılanmasını ve gerçek zamanlı verilerin çevrimiçi toplanmasını sağlayabilmektedir. Frekans tanımlama (RFID) etiketleri ve okuyucular, akıllı sensörler, barkodlar, kablosuz ağlar, sensör ağları sayesinde veriler gerçek zamanlıdır. Reaktif üretim stratejisiyle karşılaştırıldığında, gerçek zamanlı stratejinin veri toplama, işleme, analiz ve karar verme anlamında katkısı çok daha yüksektir.
- Üçüncü aşama: Tahmine dayalı yönetim ve kontrol stratejileri çerçevesinde makine öğrenimi, sınır ağları, veri madenciliği, bulut bilişim ve büyük veri ile ilgili teknolojilerin geniş uygulamalarıyla birlikte, potansiyel olarak üretimdeki olası sorunları tahmin etmek mümkündür olabilmektedir. Bir ürünün kalitesi, ekipmanın ve çalışanın davranışı ve durumu ilgili personel tarafından tahmin sonuçları izlenerek anormallikler ve sorunlar önceden önlenmektedir. Bu yaklaşım ile büyük veri ve dijital ikiz teknolojileri kullanılarak; verilerden öngörü geliştirebilmek mümkün hale gelebilmektedir.
- Dördüncü aşama: Proaktif yönetim ve kontrol stratejileri çerçevesinde üretim sistemi sadece ekipmanın ve çalışanın davranışını ve durumunu tahmin etmekle kalmamaktadır. Aynı zamanda tahmin sonuçlarına dayanarak kararları bağımsız olarak da alabilmektedir. Hatta CPS'in otonom ve kendini yeniden yapılandırma işlevlerine dayalı olarak üretim alanındaki fiziksel varlıkları da kontrol edebilmektedir. Proaktif strateji, yapay zeka ve dijital ikiz teknolojisi ile birlikte tahmine dayalı stratejinin gelişmiş bir uzantısıdır. Büyük veri üzerinden yapılan analizleri üretim mekanizmalarına uygulamak, proaktif üretim marifetiyle "akıllı üretim" kavramının nihai hedefi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Zhuang [51] makalesinde; mevcut durumda montaj şirketlerinin hangi aşamada olduğunu da belirtmiş ve çoğunluğun hala ilk aşamada bulunduğunu vurgulamıştır.

#### 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (CONCLUSION AND EVALUATION)

IoT kavramı ilk ortaya konulduktan sonra hemen gelişme imkanı bulamamış olsa da nesneleri takip etmekte faydalanan radyo frekans tanımlama çiplerinin (RFID) maliyetlerinin her geçen gün azalmasıyla kısa zamanda yeni bir devrimin tetikleyicisi olma şansını yakalamıştır. Kısa zamanda ürünlere ait toplanan ve depolanan veriler devasa boyutlara ulaşmış, büyük veri uygulamaları sayesinde yeni iş modelleri ortaya çıkmıştır. Ürünlerin ve süreçlerin gerçek zamanlı verileri yapay zeka, makine öğrenmesi ve kestirimci analiz teknikleri ile birlikte sadece ürün veya sürecin dijital takibini sağlamamış aynı zamanda insan müdahalesine gerek kalmadan ürünlerin, makinelerin ve süreçlerin kendi kendilerini yönetmelerini ve karar vermeleri de olanaklı kılmıştır. Dijital ikizi dijital bir kopyadan ayıran ve Endüstri 4.0 için anahtar bir teknoloji haline getiren de dijital ikizin fiziksel üründe ortaya çıkabilecek olası bütün durumları değerlendirebilmesi böylelikle fiziksel ürünün kendi kendini yönetebilmesi ve karar verebilmesine imkan sağlamasıdır.

IoT teknolojisinin dijital ikiz teknolojisinin kullanımını da olanaklı kılmasıyla son dönemde farklı sektörlerde ait ürün geliştirme ve süreç iyileştirme çalışmalarında kullanımı artmaya başlamıştır. Gartner'ın öngörüsüne göre; 2021 yılına kadar büyük sanayi şirketlerinin yarısının dijital ikiz kavramını kullanacağını ve bu kuruluşların etkinliklerinde en az % 10'luk bir iyileşme elde edeceği tahmin edilmektedir. Enerji sektöründe; rüzgar tribünlerinin performans iyileştirmelerinde ve önleyici bakım onarım çalışmalarında kullanılmakta, havacılık ve uzay sektöründe; uçuş aracının ve pilotaj yetkilisinin yaşamsal ve kritik parametrelerinin izleme ve takibinde kullanılmaktadır. Otomotiv alanında araç üretim süreçlerinde ortaya çıkan ürünün üretim istatistikleri ve kullanıcı deneyimlerinde optimizasyon amaçlı kullanılmaktadır. Örneğin; 2015 yılında Siemens ile birlikte Maserati araçlarının üretim süreçlerinde kullanılan dijital ikiz kavramı ile üretim hattında verimlilik artırıcı önemli iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Dijital ikiz kavramının uygulanması ve üretkenlik artışına sebep olan benzer uygulamalar telekomünikasyon sektöründe, sağlık sektöründe de görülmüştür.

Ülkemizde ise Türk Havacılık ve Uzay Sanayii (TUSAŞ), Siemens PLM Software ile üretim tesisinde bütünsel bir dijital ikiz uygulaması için işbirliği anlaşması imzalamıştır. Bu sayede Türk Havacılık ve Uzay Sanayii programlarının daha hızlı hayata geçirilmesi ve ürünlerin pazara sunulma süresinin önemli ölçüde kısılması hedeflenmektedir.

Her geçen gün önemi ve kullanım alanı artan, Endüstri 4.0'ı işletmeler için uygulanabilir kılan dijital ikizler her ne kadar işletmeler için çok fazla ekonomik ve zaman faydası sağlamayı vaatse de; dijital ikizlerin karmaşıklığı ve uygulama maliyetleri kullanım amaçlarına göre değişmekte ve bu maliyetlerin işletme

büyükliklerine göre getirdiği faydalar henüz tam olarak ortaya konulamamaktadır. İşletme uygulamalarında daha çok yüksek güvenlik standartları gerektiren, test ve simülasyon maliyetleri yüksek olan, çok parçalı ve karmaşık ürünlerin üretilmesi ve takibinde kullanılan ve işletmeler tarafından büyük faydalar sağlanan dijital ikizlerin basit, az parçalı, test maliyetleri düşük olan ürünler için kullanımı ile ilgili sonuçlar henüz yeterli seviyede değildir. Hem dijital ikiz oluşturma teknolojilerinin henüz başlangıcında olmamız nedeniyle hem de farklı sektörlerdeki ve farklı büyüklüklerdeki işletme uygulama sonuçlarında elde edilen başarılarla ilgili kıyaslama verisine sahip olmamız nedeniyle dijital ikizler hala geliştirilmeye ve anlaşılmaya çok açıktır.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandığı materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Esra KUMAŞ:** Literatür araştırması yapmış ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir

**Serpil EROL:** Literatür araştırması yapmış ve daha önce araştırmaların sonuçlarının değerlendirilmesine katkı sağlamıştır.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Zhuang C., Liu J. and Xiong H., "Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96: 1149–1163, (2018).
- [2] Grieves M., "Origins of the digital twin concept". *Working Paper*, Florida Institute of Technology, (2016). [https://www.researchgate.net/publication/307509727\\_Origins\\_of\\_the\\_Digital\\_Twin\\_Concept](https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept) Yayınlanma Tarihi: Ağustos 2016. Erişim Tarihi Ağustos 2020
- [3] Grieves M., "Product lifecycle management: driving the next generation of lean thinking". *McGraw-Hill Education*, New York, (2006).
- [4] National Aeronautics and Space Administration (NASA), "Technology area 12: materials, structures, mechanical systems and manufacturing road map". USA, (2010). Yayınlanma Tarihi: Kasım 2010. Erişim Tarihi: Ağustos 2020.
- [5] Glaessgen E. H. and Stargel D.S., "The digital twin paradigm for future NASA and US air force vehicles". *53rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference: Special Session On Digital Twin*, Hawaii, 1818-1832, (2012).
- [6] Grieves M. and Vickers J., "Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems". *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer International Publishing, Switzerland, (2017).
- [7] Rayes A. and Salam S., "Internet of things from hype to reality the road to digitization", *Springer Nature*, Switzerland, (2017).
- [8] GE Türkiye Blog, "Öngörü ve verimliliğin adı: dijital ikiz". <https://geturkiyeblog.com/ongoru-ve-verimliliigin-adi-dijital-ikiz/>. Yayınlanma Tarihi: Haziran 2018. Erişim Tarihi: 20 Ağustos 2020.
- [9] GE Türkiye Blog, "Tedarik zincirinde dijital ikiz devri", <https://geturkiyeblog.com/tedarik-zincirinde-dijital-ikiz-devri/>. Yayınlanma Tarihi: Ekim 2018. Erişim Tarihi: Ağustos 2020.
- [10] Tuegel E. J., Ingrassia A. R., Eason T. G. and Spottswood S. M., "Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin". *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011: 1-14, (2011).
- [11] Tuegel E. J., "The airframe digital twin: some challenges to realization". 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, *Structural, Dynamics and Materials Conference*, Honolulu, Hawaii, 2012: 7177-7184, (2012).
- [12] Reifsnider K. and Majumdar P.K., "Multi-physics stimulated simulation digital twin methods for fleet management". *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Co-located Conferences*, Boston, Massachusetts, 2013:1578, (2013).
- [13] Cerrone A., Hochhalter J., Heber G. and Ingrassia A., "On the effects of modeling as-manufactured geometry: toward digital twin", *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Aerospace Engineering*, 2014: 10, (2014).
- [14] Boschert S. and Rosen R., "Digital twin—the simulation aspect". *Mechatronic Futures*, Springer-Verlag, Berlin, (2016).
- [15] DebRoy T., Zhang W., Turner J. and Babu S.S., "Building digital twins of 3d printing machines". *Scripta Materialia*, 135: 119-124, (2017).
- [16] Stark R., Kind S. and Neumeyer S., "Innovations in digital modeling for next generation manufacturing system design". *CIRP Annals Manufacturing Technologies*, 66(1): 169-172, (2017).
- [17] Zhang H., Liu Q., Chen X., Zhang D. and Leng J., "A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line". *Special Section on Key Technologies for Smart Factory of Industry 4.0*, 5(2017): 26901–26911, (2017).
- [18] Tavares P., Silva J. A., Costa P., Veiga G. and Moreira A. P., "Flexible work cell simülator using digital twin methodology for highly complex systems in Industry 4.0", *Iberian Robotics Conference*, Sevilla, İspanya, 541–552, (2017).
- [19] Gartner, "Prepare for the Impact of Digital Twins", <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/prepare-for-the-impact-of-digital-twins/>. Yayınlanma Tarihi: Eylül 2017. Erişim Tarihi: Temmuz 2020.
- [20] Turing A. M., "Computing machinery and intelligence", *Mind*, (59): 433-460, (1950).
- [21] Klaus K., Rosemann R. and Gable G.G., "What is ERP?". *Information Systems Frontiers*, 2(2): 141–176, (2000).
- [22] Hozdić E., "Smart factory for Industry 4.0: a review", *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 7(1): 28-35, (2015).
- [23] Zühlke D., "Smart factory towards a factory of things". *Annual Reviews in Control*, 34(1): 129-138, (2010).

- [24] Rajagopal P., “An innovation-diffusion view of implementation of erp systems and development of a research model”, *Information & Management*, Elsevier, 40(2): 87-114, (2002).
- [25] Bayraktar E. and Efe M., “Kurumsal kaynak planlaması (ERP) ve yazılım seçim süreci”. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (15): 689-709, (2006).
- [26] Niemann J. and Westkämper E., “Dynamic life cycle control of integrated manufacturing systems using planning processes based on experience”. *38th International Seminar on Manufacturing Systems*, Brazil, (2005).
- [27] Jucke D., Constantinescu C. and Westkämper E., “Smart factory – a step towards the next generation of manufacturing”. *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier The 41st CIRP Conference on Manufacturing System*, Tokyo, 115-118, (2007).
- [28] Ashton K., “That ‘internet of things’ thing”, *RFID Journal*, (2009). <https://www.rfidjournal.com/that-internet-of-things-thing> . Yayınlanma Tarihi: Haziran 2009. Erişim Tarihi: Ağustos 2020.
- [29] Ferguson T., “Have your objects call my object”. *Harvard Business Review*, <https://hbr.org/2002/06/have-your-objects-call-my-objects> Yayınlanma Tarihi: Haziran 2002. Erişim Tarihi: Ağustos 2020.
- [30] Madakam S., Ramaswamy R. and Tripathi S., “Internet of things (IoT): a literature review”. *Journal of Computer and Communications*, 3 (3): 164-173, (2015).
- [31] Rifkin J., “Nesnelerin interneti ve işbirliği çağı”. *Optimist Yayınları*, 401, İstanbul, (2015).
- [32] Weiser M., “Some computer science issues in ubiquitous computing”. *Communications of the ACM*, 36(7), (1993).
- [33] Westkämper E., Constantinescu C. and Hummel V., “New paradigms in manufacturing engineering: factory life cycle”. *Production Engineering*, 13 (1): 143-146, (2006).
- [34] Demirel M. Y. and Karaağaç İ., “Bilgisayar destekli üretim süreçlerine genel bir bakış”. *Mühendis ve Makina*, 55 (652): 51-61, (2014).
- [35] Jain S., Choong N. F., Aye K. M. and Luo M., “Virtual factory: an integrated approach to manufacturing systems modeling”. *International Journal of Operations & Production Management*, 21 (5/6): 594-608, (2001).
- [36] Georgia Institute of Technology, The Virtual Factory Lab (VFL), 20.07.2020 tarihinde <https://factory.isye.gatech.edu/> adresinden erişildi.
- [37] Upton D. M. and A. P. McAfee, “The real virtual factory”. *Harvard Business Review*, (1996). <https://hbr.org/1996/07/the-real-virtual-factory> . Yayınlanma Tarihi: Temmuz 1996. Erişim Tarihi: Temmuz 2020.
- [38] Kelsick J. and Vance, J. M., “The VR factory: discrete event simulation implemented in a virtual environment”. *Proceedings, Proceedings of DETC'98 ASME Design Engineering Technical Conference*, Georgia, (1998).
- [39] Chakravarthy S. and Tufekci S., “Flexible manufacturing system simulation using Sentinel — an active object oriented database management system”. *Cooperative Knowledge Processing for Engineering Design*, Springer, Boston, (1998).
- [40] Nikolakis N, Maratos V. and Makris S., “A cyber physical system (CPS) approach for safe human-robot collaboration in a shared workplace”. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, (56): 233–243, (2019).
- [41] Blosser R., “Self-cleaning surfaces—virtual realities”. *Nature Materials*, 2 (5): 301–306, (2003).
- [42] Stone R. J., "Virtual reality and cyberspace: from science fiction to science fact". *Information Services and Use*, 11(5-6): 283-300, (1991).
- [43] Carter R., “Information technology”. *Made Simple Books*, Oxford, (1991).
- [44] Burdea C. G. and P. Coiffet. “Virtual reality technology”. *John Wiley & Sons: New York*, USA, (2003).
- [45] Azuma R.T., “A survey of augmented reality”. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6 (4) 355 – 385, (1997).
- [46] Lee J., “Smart factory systems”. *Informatik Spektrum, Springer-Verlag*, 38(3), Berlin, (2015).
- [47] Wellener P., “2019 Deloitte and mapi smart factory study: capturing value through the digital journey”. *Deloitte Insights and MAPI*, Deloitte, USA, (2019).
- [48] Lichtblau K., Stich V., Bertenrath R., Blum M., Bleider M., Millack A., Schmitt K., Schmitz E. and Schröter M., “Industrie 4.0 readiness IMPULS-stiftung”. *VDMA*, Almany, (2015).
- [49] Yao X., Zhou J., Zhang C. and Liu M., “Smart manufacturing based on cyber-physical systems and beyond”. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30: 2805–2817, (2017).
- [50] Yao X., Zhou J., Lin Y., Li Y., Yu H. and Liu M., “Proactive manufacturing—a big-data driven emerging manufacturing paradigm”. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 23(1): 172–185, (2017).
- [51] Zhuang C., Liu Q., Zhang D. and Leng J., “A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line”. *Special Section on Key Technologies for Smart Factory of Industry 4.0*, 5: 26901-26911, (2017)