

## İŞLETMELER İÇİN YENİ BİR VERİMLİLİK TEKNOLOJİSİ: DİJİTAL İKİZ

Meral ÇALIŞ DUMAN<sup>1</sup>

### ÖZET

**Amaç:** Bu makalenin amacı, Endüstri 4.0 ile önemi artan dijital ikiz kavramının yeri, önemi, verimliliği ve gelecekteki potansiyelini anlamak, diğer çalışmalar için temel oluşturmak adına literatüre katkı sağlamaktır.

**Yöntem:** Bu çalışmanın yöntemi literatür taramasıdır. Dijital ikiz ve işletmelerde kullanımı ile ilgili en güncel makaleler, bildiriler, gazete ve internet haberlerine dair örnek uygulamalar incelenerek, konu ile ilgili derinlemesine bir derleme makale çalışması yapılmıştır.

**Bulgular:** Değerlendirme sonuçlarına göre, dijital ikiz teknolojisi işletmeler için bir çözüm yoludur. Dijital ikiz teknolojisinin katkısı ile siber fiziksel sistemler ve nesnelerin interneti başta olmak üzere Endüstri 4.0 teknolojileri daha etkin kullanılabilir. Dijital ikiz, esnek, daha hızlı, kaliteli ve kişiselleştirilmiş ürünler elde edilmesine yardımcı olmaktadır. İşletmelerin tahmin etme, güvenlik, teşhis etme ve mevcut durumu sorgulamasında önemli avantaj sağlayan dijital ikizler, karar vermede isabet gücünü, ürün ve hizmetlerde kaliteyi, operasyonel faaliyetlerde hızı artırarak, toplamda işletme verimliliğini ve örgütsel performansı iyileştirip işletmelerin rekabet gücünü artırmaktadır.

**Özgünlük:** Dijital ikiz kavramının yeni ortaya çıkmasına bağlı olarak literatürde önemli bir boşluk bulunmaktadır. Bu nedenle makale, dijital ikiz hakkında bilgi veren, üretimde faydaları ve uygulamaları üzerine odaklanan ilk yerli çalışmalar arasındadır.

**Anahtar Kelimeler:** Dijital İkiz, Endüstri 4.0, Nesnelerin İnterneti, Simülasyon, Verimlilik.

**JEL Kodları:** M10, M11, M21, L25.

## A NEW PRODUCTIVITY TECHNOLOGY FOR BUSINESS: DIGITAL TWIN

### ABSTRACT

**Purpose:** The aim of this article, to understand the place, importance, efficiency and future potential of the digital twin concept, which has increased in importance with Industry 4.0, and to contribute to the literature in order to form the basis for other studies.

**Methodology:** The method of this study is literature review. An in-depth review article study was conducted by examining the latest articles, proceedings, sample applications of newspaper and internet news about the digital twin and its use in businesses.

**Findings:** According to the evaluation results, digital twin technology is a solution for businesses. With the contribution of digital twin technology, Industry 4.0 technologies, especially cyber physical systems and internet of things, can be used more effectively. Digital twin helps to obtain flexible, faster, quality and personalized products. Digital twins, which provide significant advantages in forecasting, security, diagnosis and questioning of the current situation, increase the power of accuracy in decision making, quality in products and services, speed in operational activities, improving overall operational efficiency and organizational performance and increasing the competitiveness of enterprises.

**Originality:** There is an important gap in the literature due to the new emergence of the digital twin concept. For this reason, the article is among the first domestic studies that provide information about the digital twin and focus on its benefits and applications in production.

**Keywords:** Digital Twin, Industry 4.0, Internet of Things, Simulation, Efficiency.

**JEL Codes:** M10, M11, M21, L25.

<sup>1</sup> Dr. Öğretim Üyesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Akçadağ Meslek Yüksekokulu, Yönetim ve Organizasyon Bölümü, Malatya, Türkiye, meral.duman@ozal.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8283-5188.

## 1. GİRİŞ

Son zamanlarda büyük veri, yapay zekâ, blok zinciri, nesnelerin interneti, dijital ikiz gibi yeni teknolojiler hızla gelişirken, akıllı işletmeler, kripto paralar, otonom araçlar ve sürdürülebilirlik gibi yeni kavramlara da ilgi artmaktadır (Deng ve diğerleri, 2021) ve tüm dünya Endüstri 4.0 vizyonu ile büyük bir dönüşüme girmektedir. Bu dönüşüme ayak uydurmak için eğitim, savunma ve üretim gibi alanlarda önemli değişimler yaşanmaktadır. Özellikle sanayi ve üretim sektörü en çok değişen ve dönüşen sektörler arasındadır. Nitekim Endüstri 4.0, sanayinin akıllı hale dönüşmesi (Faller ve Feldmüller, 2015) veya üretimde bilgi ve iletişim teknolojilerinin entegrasyonunun artması (Basl, 2016) şeklinde tanımlanmaktadır.

Üretim sektörü, Endüstri 4.0 olarak bilinen dördüncü sanayi devriminin çatısı altında hızla dönüşmektedir. İşletmeler bu dönüşümü yakalayabilmek için Endüstri 4.0 teknolojilerini kullanmaya başlamaktadır. Bu teknolojilerden elde edilen veriler sayesinde gerçek zamanlı izleme, tahmin, karar verme ve adaptasyon gibi stratejik kararlar alınmaktadır. Bu sayede işletmeler için kısa ürün geliştirme süresi, talebe göre ürün bireyselleştirme, üretim hattının esnekliğinin artırılması, ademi merkezîyetçilik ve kaynak verimliliği gibi sonuçlar elde etmektedir. Yaşanan bu gelişmeler ile üretim sektörü tüketicilerin beklentileri ve sorunları için bir çözüm sağlayıcı haline dönüşmektedir (Zhu ve diğerleri, 2021). Değişen üretim anlayışı işletmeleri önceden olduğu gibi sadece yalın olmaya değil hem yalın hem de çevik olmaya itmektir. Verinin ve bilginin petrol değerinde olduğu günümüzde, verilerden anlamlı bilgiler elde etmek ve bunu yaparken de hızlı ve verimli olmak gerekmektedir. Verilerin anlamlı hale dönüştürülmesi, karar süreçlerinde ve üretim süreçlerinde bu bilgilerden faydalanılması daha kaliteli bir üretim sürecini ortaya çıkararak işletmeler için önemli bir rekabet unsuru olmuştur (Apillioğulları, 2019: 27). Bu açıdan dijital ikiz ve siber-fiziksel sistemler (SFS) akıllı üretimde ürün tasarımı, bilgi odaklı üretim, isteğe bağlı hizmetler ve iş uygulamaları üzerinde gelecek vaat eden, katma değer sağlayan ve gittikçe kullanma eğilimi artan iki teknolojidir (Lee ve diğerleri, 2021: 87). Hatta dijital ikiz Deng ve diğerlerine (2021) göre dijital dönüşümün kaçınılmaz hedefidir.

Dijital ikiz, akıllı üretim ve Endüstri 4.0'ı gerçekleştirmek için en umut verici teknolojilerden biridir. Bu teknoloji bazen geleneksel modelleme ve simülasyon ile karıştırılabilmektedir. Bu noktada denilebilir ki dijital ikiz, diğer teknolojilerden farklı olarak fiziksel ve sanal entegrasyonu yüksek, gerçek zamanlı veriler ile etkileşim kuran süreç ve hizmetlerin dinamik sanal bir modeldir. Literatürde henüz dijital ikizin yüksek kaliteli bir uygulaması bulunmamaktadır (Singh ve diğerleri, 2021). Çünkü Zheng ve diğerleri (2019) dijital ikiz teknolojisinin kullanımının zor olduğunu, yüksek hassasiyetli simülasyon modellerine sahip olunması gerektiğini ve uygulamalar için sanal test modellerinin ve model belirsizlik hesaplamasının yetersiz olduğunu, karmaşık sistemlerin tahmin hassasiyetinin düşük olduğunu ve son olarak veri toplama ve işlemenin karmaşık olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan araştırmalara bakıldığında, dijital ikiz uygulaması bağlamında, araştırmacılar sıklıkla SFS, büyük veri veya nesnelerin interneti (Nİ) kullanımını araştırmışlardır (Tao ve diğerleri, 2019; Singh ve diğerleri, 2021). Halbuki Endüstri 4.0 içinde barındırdığı teknolojik bileşenlerin toplamından oluşmaktadır. Tam anlamıyla Endüstri 4.0'a geçiş birçok teknolojinin kullanılması ve teknolojilerin işletme süreçlerine entegre edilmesi ile mümkündür (Meissner ve diğerleri, 2017). Özellikle siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, dijital ikiz gibi teknolojiler Endüstri 4.0 için vazgeçilmezdir (Schwab, 2016: 76).

İşletmeler açısından uygulamalara bakıldığında bu teknolojilerin ayrı ayrı veya birkaçının bir arada değerlendirilmesi ve uygulanmasından dolayı (Faller ve Feldmüller, 2015) dijital ikizin tam manası ile uygulanmadığı görülmektedir. Bu konuda özellikle işletmelerin karar destek sistemlerine ve yapay zekâ uygulamalarına fazla önem vermemesi de dijital ikizin uygulanamamasına neden olabilmektedir. Yöneticilerin karar verme aşamasında karara esas teşkil edecek bilgilere ulaşımı büyük önem arz etmektedir. Bu noktada yöneticilere ilk önce bilginin organize edilmesi ve sonuçların modellenmesi konusunda destek olan bilgisayar tabanlı bir sistem olan karar destek sistemlerinin (Dönerçark ve Tecim, 2020) uygulanması tavsiye edilebilir.

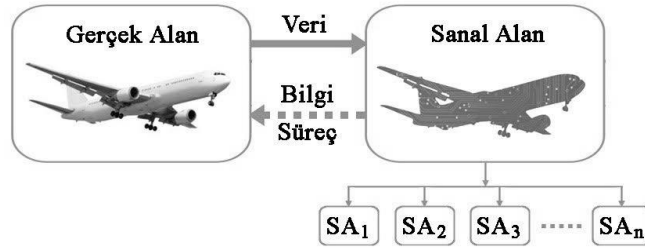
Bu bağlamda, işletmelerin gerçek zamanlı verilerinin elde edilmesi ve kullanılması, üretimde önemli bir avantajdır. Elde edilen gerçek zamanlı veriler dijital ikizlerin ortaya çıkmasının ilk koşuludur. Bu kısımda en iyi sonuçların elde edilmesi için fiziksel ve sanal dünya entegrasyonunun gerçek zamanlı, senkronize ve tutarlı olması gerekmektedir. Ancak işletmelere bakıldığında temel süreç verileri genellikle yanlış, eksik, tutarlı ve gerçek zamanlı değildir. Üretim süreçleri genellikle fazladan sipariş ekleme, görev değişimleri, zamanlama ayarları ve araç gereç arızaları nedeniyle tutarlılık göstermemektedir. Düzenli ve çevik bir üretim oluşturmak için mevcut tüm bilgileri organize etmek ve kullanmak büyük bir zorluktur (Zhang ve diğerleri, 2021). Çünkü veriler doğru ve tutarlı bir şekilde elde edilmediğinde dijital ikizi kullanmak zordur. Bu nedenle uygulamada dijital ikiz sonuçlarını görmek halen oldukça kısıtlıdır ve yerli literatürde dijital ikizle ilgili önemli bir boşluk bulunmaktadır. Ülkemizde verimlilik ve dijital ikiz ilişkisine odaklanan veriye dayalı herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Kapsamlı bir literatür araştırmasına dayanan bu çalışma, dijital ikiz

kavramının teorik altyapısı, dijital ikiz teknolojisinin uygulanması, işletmelerde dijital ikiz uygulamaları ve bu uygulamalara bağlı olarak elde edilen verimlilik ve faydalara dair özgün bir çalışma sunmaktadır. Çalışma özellikle dijital ikizin anlaşılması, daha doğru kullanımı ve verimlilikle olan ilişkisi adına araştırmacılara önemli bir kaynak oluşturmaktadır. İşletmelerin dijital ikiz teknolojisini kullanarak verimliliklerini artırmaya çalışmaları teorik kanıtlar sunan bu araştırmanın, araştırmacıların ve uygulayıcıların dijital ikizi anlaması ve benimsemesi açısından önem taşıdığı düşünülmektedir. Bu doğrultuda çalışmanın amacı, dijital ikiz ile ilgili farklı katkıların sınıflandırılmasıyla birlikte bir literatür taramasıdır. Buna göre çalışma içerisinde, ilk önce dijital ikiz kavramı ve genel çerçevesi üzerinde durulacak, daha sonra dijital ikiz teknolojisi ve üretim sektöründe kullanımı üzerine bilgi verilecektir. Özellikle işletmelerin verimliliğini artırma noktasında önemli bir avantaj sağlayan bu teknolojiye dair farkındalığı artırmak hem akademik hem de sanayide diğer araştırmaları teşvik etmek ise bu çalışmanın hedefidir.

## 2. DİJİTAL İKİZ KAVRAMI

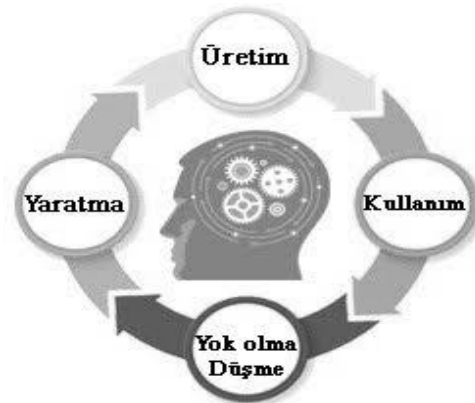
İkiz, ilk olarak 2003 yılında ürün yaşam döngüsü yönetimi konseptinin bir parçası olarak Grieves tarafından ortaya atılmıştır (Grieves, 2014). Bu kavram, ürün yaşam döngüsü yönetimi için bir “kavramsal ideal”i temsil etmiştir. Daha sonra Grieves, 2006 yılında “Bilgi Yansıtma Modeli” terimini denedikten sonra 2010 yılında “Dijital İkiz” terimini kullanmıştır. Sonunda dijital ikiz konsepti, bir ürün yaşam döngüsü yönetim aracı olmaktan çıkıp dijital bir platforma dönüşmüştür (Kahlen ve diğerleri, 2017). Bu evrimsel yol, kavramın iki ana özelliğiyle sonuçlanmıştır. Birincisi tam ürün yaşam döngüsü entegrasyonu, ikincisi ise bilişsel teknolojiler aracılığıyla güncel dinamik veri üretimi ve yönetimidir (Öztürk, 2021). Grievers'a (2019) göre, Şekil 1’de görüldüğü üzere, dijital ikizin kavramsal modeli üç ana bölümden oluşmaktadır (Shengli, 2021);

- Fiziksel dünyada fiziksel ürün;
- Siber dünyada fiziksel ürünün sanal karşılığı;
- Fiziksel alan ve siber alan arasındaki veri ve bilgi etkileşimi.



**Şekil 1. Ürün Yaşam döngüsü yönetimi (ÜYDY) için kavramsal ideal (Grieves ve Vickers, 2017: 93, yazar tarafından geliştirilmiştir)**

Kavramsal idealde, Grieves (2016) iki sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca birbirine bağlanacağını belirtmiştir. Buna göre ürün yaşam döngüsü Şekil 2’de görüldüğü üzere, sistemin yaratılması dâhil olmak üzere, üretim, operasyon/kullanım ve yok olma üzere dört aşamadan geçerken sanal ve gerçek sistemler birbirine bağlı olacaktır. Dijital ikizlerin başarılı olabilmesi için bu sistem ve cihazların kullanıcıları için değer yaratması gerekecektir. “Kullanım durumları” olarak tanımlanan bu değer, değer yaratan belirli bir kullanımın ana hatlarını çizmektedir (Grieves, 2019).



**Şekil 2. Ürün yaşam döngüsünün 4 aşaması (Grieves, 2019, yazar tarafından geliştirilmiştir)**

ÜYDY, üretim sürecinin planlama aşamasından yok olma aşamasına kadar geçen süredeki etkili bir yönetme faaliyetidir. ÜYDY, tüm üretim sürecinde uygulama, insan, veri, iş metodları ve süreçleri bütünleştirerek, süreçlerin yönetilebileceği işbirlikçi bir ortam yaratır, önceden aynı ürün için ayrı ve bağımsız olarak çalışan süreçleri, disiplinleri, fonksiyonları ve uygulamaları birleştirir (Sayer ve Ülker, 2014). Burada dijital ikiz kendi başına bir varlıktır ve fiziksel bir sistem hakkında dijital bilgilendirici bir yapı olarak karşımıza çıkmaktadır (Kritzinger ve diğerleri, 2018). Dijital ikiz kavramının ilk bilimsel kullanımı ile ilgili çalışmalardan birisi de 2010 yılında NASA tarafından yapılmıştır (Glaessgen ve Stargel, 2012). NASA tarafından dijital ikiz, bir veya daha fazla fiziksel sistemi en iyi şekilde yansıtan fiziksel modelleri, sensör verilerini ve geçmiş verileri kullanan gerçekçi, yüksek ölçeklemeli bir simülasyon olarak tanımlanmıştır. Bu simülasyonda ilgili veriler, sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca toplanır ve elde edilen gerçek zamanlı bilgiler dijital ikize aktarılır. Ana boyutlar ise zaman ve ayrıntı düzeyi olarak karşımıza çıkmaktadır (Kunath ve Winkler, 2018). NASA'ya göre dijital ikizin dört ana işlevi şu şekilde özetlenmiştir;

- Tahmin; dijital ikiz, fiziksel ürünün gelecekteki durumu ve performansını tahmin etmek için kullanılmaktadır (Grieves, 2016). Tahmin edilebilirlik işletmelerin belirsizliklerini azaltır. Örneğin, Uber taksinin varış saatinin belirsizliğini ortadan kaldırarak müşterilerin tatminini arttırmaktadır. Yine Singapur Kara Trafik Kurumu'nda geçmiş trafik verileri ve gerçek zamanlı anlık veriler kullanılarak yöneticiler trafik akışlarını kolaylıkla tahmin etmektedir. Tahminlerin kesinliği ise %85'in üzerindedir. Bu sayede yöneticiler trafik tıkanıklığını önleyebilmekte, toplu taşıma araçlarını uzaktan izleyebilmekte ve araçların doluluk oranını görüp, paydaşları ile verileri paylaşabilmektedir (Parmar ve diğerleri, 2020).
- Güvenlik; dijital ikiz teknolojisine ile sistemin sürekli olarak izlenmesi, güvenilirliği de arttırmaktadır. Dijital ikiz teknolojisi, ürün yaşam döngüsü boyunca farklı işlemleri optimize etmek ve iyileştirmek için olağanüstü bir potansiyel sunmaktadır (Zhu ve diğerleri, 2021).
- Teşhis; dijital ikiz, yaşam döngüsü boyunca fiziksel varlık hakkında bilgi edinme ve tüm proje süreçlerini sürekli olarak izleme fırsatı sunar. Bu nedenle dijital ikiz, olası arızaları doğru bir şekilde tahmin edebilir, bilgileri sisteme geri besleyebilir ve uyarıcı bilgilere göre tepki verebilir (Öztürk, 2021).
- Sorgulama; dijital ikiz mevcut ve geçmiş veriler için sorgulanabilir. Fiziksel bir ürüne dair başka işletmelerde olan benzer süreçler ve örnekler sorgulanabilir ve kıyaslanabilir. Örneğin, ürünün içindekileri, ürünün yapısı ve standartları gibi (Grieves, 2016).

NASA ve ABD hava kuvvetleri araçları için ilk kez kullanılan dijital ikizler, güvenlik veya güvenilirlikle ilgili olası sorunları belirlemek için aracın yerleşik sisteminden, bakım geçmişinden ve mevcut tüm geçmiş ve filo verilerine ilişkin verileri kullanarak ultra yüksek doğrulukta simülasyona olanak tanımıştır. O zamandan beri, dijital ikizler ürünün kullanım ömrü boyunca farklı aşamalarda sanal ve fiziksel alan arasındaki boşluğu kapatabildikleri için farklı üretim süreçlerine dahil edilmiştir (Tao ve diğerleri, 2018). Bu nedenle dijital ikiz, tasarımın uygulanabilir, güvenli, verimli ve güvenilir olmasını sağlamak için ürünün tasarım sürecinin tüm aşamalarında test edilmesini sağlamaya çalışmaktadır.

Dijital ikiz kavramı tanımlanacak olursa, eşsiz bir fiziksel üretimin sanal bir temsili olarak tanımlanabilir (Rosar ve diğerleri, 2021). Yine, dijital ikiz farklı modellerin, verilerin ve bilgilerin bir kombinasyonudur. Schroeder ve diğerleri (2016) ise dijital ikizi, bir ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca yürütülen verilerden ve farklı türde modellerden oluşan bir model olarak tanımlamaktadır. Deng ve diğerlerine (2021) göre dijital ikiz kavramı aşağıdaki özellikleri kapsamaktadır, dijital ikiz;

- Fiziksel nesnelerin mikro düzeyden makro düzeye tüm verilerini birleştirir.
- Yaşam döngüsü boyunca fiziksel üründe var olur, gelişir ve sürekli bilgi biriktirir.
- Fiziksel nesnelerin tanımlanması ve optimize edilmesini sağlar.

Bu özellikler çerçevesinde dijital ikiz, dijital temsiller oluşturmak için üç boyutlu modelleme ve sensörler kullanan varlıkların dijital kopyaları olarak ifade edilebilir (Parmar ve diğerleri, 2020). Üretim sektörü açısından dijital ikiz tanımlanacak olursa, dijital ikizi, fiziksel bir ürünün daha kaliteli, daha ekonomik, daha esnek ve daha inovatif olarak tasarlanması, üretilmesi, müşterilerin beklentilerine ve rekabet koşullarına en uygun hale getirilmesi için sanal sistemde ikizinin oluşturulmasına dair bir teknoloji olarak tanımlayabiliriz.

Dijital ikiz yeni bir kavram değildir. Otuz yılı aşkın bir süredir modelleme ve simülasyon yöntemleri olarak kullanılmaktadır. Fakat son yıllarda Endüstri 4.0 teknolojileri olan Nİ, büyük veri ve gerçek zamanlı verilerin artan kullanılabilirliği, yeni nesil dijital ikizleri mümkün kılmış ve bilinirliğini artırmıştır (Parmar ve diğerleri, 2020). Dijital ikiz, en küçük parçasından en büyük parçasına kadar fiziksel olarak üretilmiş bir ürünü temsil etmekte (Grieves ve Vickers, 2017), sanal varlıkları zenginleştirmek ve iyileştirmek için donanım, yazılım ve Nİ teknolojilerini derinden bütünleştirmektedir. Buna göre, dijital ikizler üç önemli bölümden oluşmaktadır: Fiziksel ürünler, sanal ürünler ve bunları birbirine bağlayan bağlantılar (Lu ve diğerleri, 2020;

VanDerHorn ve Mahadevan, 2021). Dijital ikizin bu bölümlerine ait tanımlamalar Tablo 1'deki gibi özetlenmiştir.

**Tablo 1. Dijital ikiz bileşenlerinin özet tanımlamaları**

<i>Bileşen</i>	<i>Tanımı</i>
<i>Fiziksel Gerçeklik</i>	
Fiziksel sistem	Dijital ikizi kurulması için seçilen fiziksel gerçekliğin parçası.
Fiziksel çevre	Seçilen fiziksel sistemin dışındaki her şeyin bu sistemi etkileyen yönleri.
Fiziksel süreç	Fiziksel sistemin üretim süreci ve sistemde durum değişikliğine neden olan işlevler.
<i>Sanal Temsil</i>	
Sanal sistem	Fiziksel sistemin verileri ve hesaplama modelleri.
Sanal çevre	Fiziksel sistem için fiziksel ortamın sanal temsilinin oluşturulması.
Sanal süreç	Fiziksel süreçlerin fiziksel ortamı nasıl etkileyeceğine dair simülasyonların kullanılması, hedeflenen sonuçlar için tahminlerin elde edilmesi.
<i>Bilgi Bağlantısı</i>	
Fizikselden sanal bağlantıya	Fiziksel sistemden gelen tüm bilgilerin elde edildiği, analiz edildiği, anlamlandırıldığı ve sanal temsile yansıtıldığı araçlardır.
Sanaldan fiziksel bağlantıya	Sanal sistemden gelen tahmin ve teşhislerin fiziksel sistemi etkileyecek eylemlere ve kararlara dönüştürülmesine dair araçlardır.

Kaynak: VanDerHorn ve Mahadevan, 2021.

Günümüzde dijital ikiz yönteminin en yaygın kullanımı fiziksel nesnelere ve süreçleri gerçek zamanlı ve sanal ortamda izlemektir. Örneğin akıllı bir konveyör, sanal temsili sayesinde, sistemin gerçek durumlarını anlamayı ve normalde ölçülmesi zor olan değişkenleri tahmin etmeyi mümkün kılmaktadır (Fedorko ve diğerleri, 2021). Bu doğrultuda sanal temsil, ürün yaşam döngüsü boyunca çeşitli kaynaklardan gelen geniş bilgileri tutar. Veriler, karar verme sürecini iyileştirmek için gelecekteki ve mevcut koşulları, yani operasyonel ve tasarım ortamlarını belirlemek için çeşitli şekillerde sürekli olarak güncellenir ve görselleştirilir (Mathupriya ve diğerleri, 2020).

Denilebilir ki, dijital ikiz simülasyonun bir sonraki/ileriki seviyesidir (Boschert ve Rosen, 2016). Birçok endüstriyel alanda büyük potansiyele sahip bu simülasyon tabanlı planlama ve optimizasyon kavramlarından biri de dijital ikizdir. Bir dijital ikiz, çeşitli amaçlar için simüle etmek için kullanılabilir, alan seviyesinden kaynaklanan algılanan verilerin gerçek zamanlı senkronizasyonundan yararlanır ve tüm üretim sistemini düzenlemeye ve yürütmeye odaklanan bir dizi eylem arasında karar verebilir (Tablo 2). Bu sonuçlar ise üretimde daha yüksek verimlilik, doğruluk ve ekonomik kazançlar sağlamaktadır (Kritzinger ve diğerleri, 2018).

**Tablo 2. Dijital ikiz kavramsal mimarisi**

<i>Oluşturma</i>		<i>İletişim</i>	<i>Toplama</i>	<i>Analiz</i>
<i>Fiziksel İşlem Alanı</i>		<i>İletişim Araçları</i>	<i>Dijital İkiz</i>	<i>Erişim Cihazları</i>
Bağlamsal Veriler (Hava, sıcaklık vb.)	ERP Sistemi & CAD Modelleri & Üretim Yürütme Yazılımı	Duyargalar (Sensör) ve Fiziksel Cihaz Yönetim Donanımları	Makine Öğrenmesi, Yapay Zekâ, İdrak ve Karar Verme ile İlgili Sistemler, Melez Sistemler	Uyarı Sistemleri Görüntüleme Sistemleri Arayüzler
İşlem Yapma				Anlamlandırma ve Karar Verme

Kaynak: Yükçü ve Aydın (2020: 569).

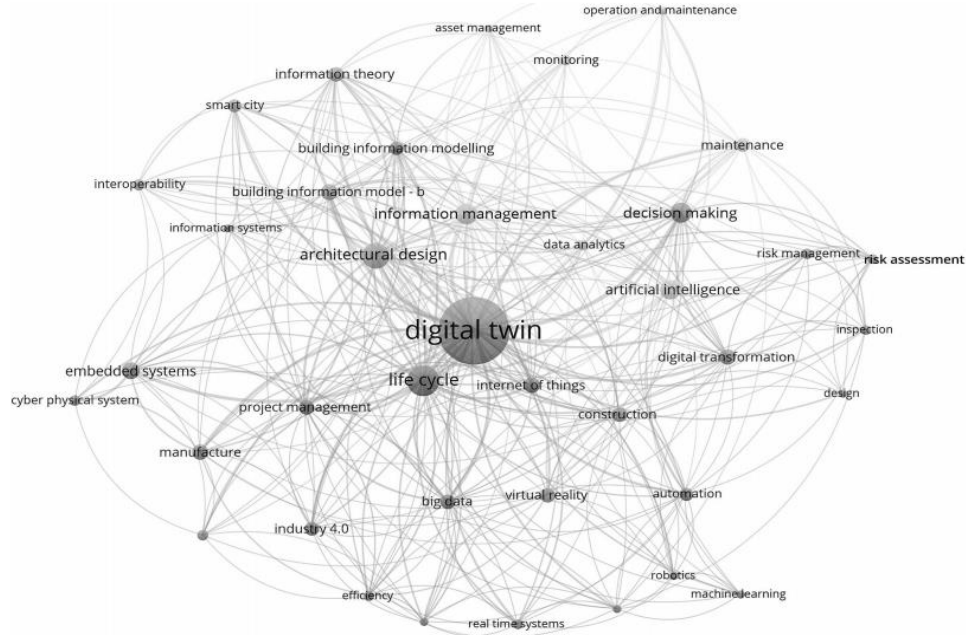
Tablo 2'ye göre üst kısımda yer alan oluşturma, iletişim, toplama, analiz işlem adımları, fiziksel işlem alanından dijital ortama doğru işlem aşamalarını göstermektedir. Altta yer alan anlamlandırma ve kavrama ile işlem yapma adımları ise dijital ikiz tarafından fiziksel ortama doğru gerçekleşen işlem adımlarıdır (Yükçü ve Aydın, 2020). Scime ve diğerlerine göre (2021) bu adımlar ile dijital ikizi uygulamak için dijital platforma ulaşılabilir. Dijital platform, üretim ekipmanı, veri depolama sistemleri ve hesaplama yeteneklerinden oluşan bir ağıdır. Bu ağ ile dijital ikiz için tasarım, simülasyon, baskı sonrası işleme ve karakterizasyon dâhil tüm üretim sürecinin yakalanması gerekir. Bu nedenle dijital iş akışı fiziksel üretim süreci, teknisyenler ve mühendisler ile dijital platform arasındaki etkileşim olarak karşımıza çıkmaktadır.

### 3. DİJİTAL İKİZ UYGULAMALARI

Dijital ikizler, siber-fiziksel ile ilgili sistemler için gerekli olan akıllı nesnelerin ortaya çıkmasına katkıda bulunmuştur (Li ve diğerleri, 2021). Bu katkı, fiziksel nesnede planlanan herhangi bir değişikliği, uygulamadan önce sanal ortamda test edebilme imkânını vermiştir (Grieves, 2016). Bu avantaj sadece üretim sektörünün değil, birçok farklı sektörün dikkatini çekmiştir. Bu bağlamda her sektörde dijital ikiz teknolojisini görmek mümkündür.

Dijital ikiz, sorunları ortaya çıkmadan önce öngörebilmek, arızalanma ve zaman kaybını önlemek, hatta simülasyonları kullanarak geleceği planlamak için verilerin analizine ve sistemlerin izlenmesine izin veren bir teknolojidir. Bu nedenle en fazla üretim sektöründe kullanılmakla birlikte, dijital ikiz eğitim, sağlık, akıllı şehirler gibi diğer çalışma ve iş alanları içinde yeni potansiyel kullanımlar bulmaya başlamıştır (Mashaly, 2021). Örneğin, akıllı şehirler tarafından üretilen verilerle dijital ikizler, kentsel planlama ve politika kararlarını modellemek için kullanılabilir. Dijital ikiz, şehirlerin gerçek zamanlı uzaktan izlemeyi gerçekleştirmesine yardımcı olmakta ve daha etkili karar almaya olanak tanımaktadır (Deng ve diğerleri, 2021). Ayrıca akıllı bir şehrin fiziksel değişim kararlarında dijital ikizleri ile geri bildirimler sağlanabilmektedir (White ve diğerleri, 2021). Yine farklı bir sektörden örnekle, sağlık alanında dijital ikiz iki farklı şekilde karşımıza çıkmaktadır. İlki hastanelerin tasarlanmasında, ikincisi ise hastaların bakımındadır. Akıllı ve giyilebilir teknolojiler sayesinde insanlardan sağlık verilerini alan sensörler insanların veya diğer medikal sistemlerin simülasyonu ile dijital ikizleri oluşturulabilmektedir (Shaw ve Fruhlinger, 2019). Anlık olarak izlenebilen bu verilerle önleyici sağlık hizmetleri mümkün olmaktadır. Dijital ikizler, ilk yardım operatörlerine ve bakımçılarına ek sistem farkındalığı sağlayarak bu güvenilirliği kolaylaştırıp sağlamlığı artırmaktadır (Kutzke ve diğerleri, 2021). Eğitim sektöründen bir örnekle, Göçen (2020) çalışmasında dijital ikizin açık ve uzaktan öğrenmede kullanılabileceğini, özellikle kişiselleştirilmiş uyarlanabilir öğretim tasarım süreçlerinde, öğrenenlere ilişkin veri kaynağı oluşturarak sistemden ayrılmalara ilişkin anlık uyarı sistemleri tasarlamada, öğrenci destek hizmetlerinde ve sanal sınıfların oluşturulmasında dijital ikizden yararlanılabileceğini belirtmiştir.

Dijital ikiz uygulamaları, hayal bile edilemeyen disiplinlerde de bulunabilir. Bu tür disiplinler, örneğin, düşük enerjili binaların tasarımında ve geliştirilmesinde dijital ikiz yönteminin kullanıldığı inşaat endüstrisi olabilir (Kaewunruen ve diğerleri, 2019). Örneğin, Ceylan (2019) dijital ikizlerin inşaat sektörü için yapı bilgi modelleme süreçlerinde kullanılabileceğini, yapı bilgi modelleme ile dijital ikizlerin birbirlerine destekçi iki teknoloji olarak kullanılırsa önemli faydalar sağlayacağını belirtmiştir. Özen ve Gürel (2020) çalışmalarında kamu denetiminde dijital ikiz teknolojisinin üzerinde durmuş, dijital ikizin sunduğu sürekli modern denetim ile bilgi teknolojilerinin ve verilerin güvenliğinin sağlanması yoluyla denetim kalitesine önemli katkılar sunduğunu belirtmişlerdir. Buna göre dijital ikiz teknolojisinin sağladığı sürekli denetim ile teknolojik imkânlardan faydalanılarak yapılan, risk odaklı ve önleyici bir sürekli denetimle her aşamada değerlendirme sağlanacak ve sürekli izleme, kontrol ve raporlama ile güvenilir, eş zamanlı, verimli denetim faaliyetleri gerçekleştirilebilecektir. Dijital denetim konusunda Erturan ve Ergin (2018) yaptığı çalışmada, dijital ikiz ile denetçilerin denetlediği işletme ile ilgili verilere gerçek zamanlı olarak ulaşacağını ve oluşan hataları tam zamanlı olarak düzeltebileceğini ifade etmişlerdir. Böylece dijital ikizin denetim maliyetlerini düşürebileceğine, iş yükünü azaltabileceğine ve denetim kalitesinin artmasına yardımcı olabileceğini belirtmişlerdir. Yükçü, Aydın ve Koçakoğlu (2020) bağımsız denetimde dijital ikiz uygulamasının iki şekilde kullanıldığını belirtmişlerdir. Birincisi bağımsız denetim şirketinin kendi içinde dijital ikiz uygulaması ile kendi yaptığı bağımsız denetimin denetimini yapmasıdır. İkincisi ise Kamu Gözetim Kurumunun kendisine gönderilen sözleşmelerin denetimini dijital ikiz ortamında yapması şeklinde olduğunu belirtmişlerdir. Yine mimari, mühendislik, inşaat, işletme ve tesis yönetimi gibi birçok farklı alanda dijital ikiz kullanılmakta olup Şekil 3'te görüldüğü üzere, dijital ikizin literatürde birçok farklı değişken ile ilişkileri araştırılmaktadır. Bu değişkenler arasında, risk değerlendirme, varlık yönetimi, tamir ve bakım, bilgi yönetimi, mimari tasarım, gömülü sistemler, proje yönetimi, yaratıcılık, dijital dönüşüm, akıllı şehirler ve otomasyon gibi konular bulunmaktadır (Öztürk, 2021).



**Şekil 3. Mimari, mühendislik, inşaat, işletme ve tesis yönetimi endüstrisindeki dijital ikiz araştırmalarının anahtar kelime eş oluşum analizi haritası (2013-2021 yılları)**

Dijital ikiz teknolojisi işletmeler için bir çözümdür. Özellikle Endüstri 4.0 teknolojileri ile dijital ikiz teknolojisi önemli bir çıkış sağlamıştır. Dijital ikizin işletmelere vaat ettiği potansiyel faydalar cazibesini artırmaktadır. Bu konuda yapılan araştırmalara göre, dijital ikiz teknolojisinin Pazar boyutu yaklaşık 3,1 milyar dolardır ve bu rakamın 2026 yılına kadar 48,2 milyar dolar olması beklenmektedir (Leng ve diğerleri, 2021). Uluslararası Veri Şirketi ise Global 2000 şirketlerinin %30'unun ürün inovasyon başarı oranlarını ve kurumsal verimliliği iyileştirmek için NI bağlantılı ürün ve varlıkların dijital ikizlerinden veri kullanacağını ve %25 verimlilik artışı sağlayacağını öngörmektedir (Bulut, 2020). Bu teknolojinin benzersiz faydalarından yararlanan ilk beş sektör ise havacılık ve savunma, üretim, sağlık ve ilaç, enerji ve hizmet ve ulaştırma sektörleridir. Örneğin, enerji ve kamu hizmetleri sektörünün müşterilerine optimize edilmiş hizmetler sunmak için dijital ikizi bir izleme, tahmine dayalı, analitik araç olarak kullanması düşünüldüğünde, ulaştırma sektöründe, tren istasyonlarında veya havalimanlarında kapasite planlaması, planlama ve ulaşım varlıklarının ilerlemesinin izlenmesine dijital ikizlerin yardımcı olması beklenmektedir (Handan, 2021).

Sağlık hizmetlerinde dijital ikizler, güvenli bir ortam oluşturmak ve olası değişikliklerin sistem performansları üzerindeki etkisini test etmek için bir hastane sistemini yakalamak ve görselleştirmek için kullanılmaktadır. Belirli prosedürlerin sonucunu tahmin etmek için bir dijital ikiz kullanılabilir. Belirli bir hasta için daha iyi tedavi seçeneği belirlenebilir. Örneğin, Aydın ve Karaarslan (2020) Covid-19 hastalığının belirtilerinin tespitinde dijital ikiz tabanlı bir sistem kullanılmasının süreci kolaylaştıracağını belirtmişlerdir. Yine, deniz ve deniz taşımacılığı alanında dijital ikizler tasarım desteği olarak kullanılmaktadır. Dijital ikiz, tüm temel bileşenlerin görselleştirilmesine, analizlerin ve hesaplamaların yapılmasına ve operasyonun geminin yapısal ve işlevsel bileşenleri üzerindeki etkilerinin kontrolünün iyileştirilmesine olanak tanımaktadır (Semeraro ve diğerleri, 2021).

GE, IBM, PTC, Oracle, Microsoft, Siemens, SAP, Bosch, Software AG gibi pek çok şirket, Şekil 4 ve Tablo 3'te görüldüğü üzere, birçok alanda kullandıkları ve ürettikleri ürün ve sistemler için gerçek zamanlı olarak dijital ikiz kullanmaktadır. Tesla, üretilen her araba için bir dijital ikiz geliştirmeyi ve araba ile fabrika arasında senkronize veri iletimini sağlamayı amaçlamaktadır. General Electric rüzgâr çiftlikleri ve Siemens makine-insan arayüzleri geliştirmek için patentlere sahiptir (Singh ve diğerleri, 2021). Yine Maserati'nin Ghibli fabrikası da dijital ikiz teknolojileriyle, yeni ürün geliştirme süresi %30 kısılırken ürünlerin pazara çıkış süresi 30 aydan 16 aya düşmüş ve üretilen otomobil sayısı üç kat artmıştır (Thinktech, 2020).



**Şekil 4. Dijital ikiz uygulama örnekleri (Semeraro ve diğerleri, 2021, yazar tarafından geliştirilmiştir.)**

**Tablo 3. Bazı dijital ikiz uygulamaları**

<i>İşletme/Kurum</i>	<i>Ana Dijital İkiz Değeri</i>	<i>Ana Ürün/Hizmet</i>
ANSYS	Daha iyi tahmin yapmak için analitikle birleştirilmiş simülasyon.	Analiz yazılımı.
Dassault Systemes	Sanal bir fabrikanın tasarımı ve simülasyonu.	3D tasarım ve ürün yaşam döngüsü yönetimi yazılımında uzmanlaşma.
Bosch	Nİ cihazları için dijital ikizlerin envanter yönetimi ve üretim süreçlerinin analiz edilmesi.	Otomotiv parçaları, elektrikli el aletleri, güvenlik sistemleri, ev aletleri, mühendislik, elektronik, bulut.
GE	Performans iyileştirme ve tahmin.	Aletler, güç, yenilenebilir enerji, havacılık ve sağlık.
IBM	Ekipman arızasının tahmin edilmesi; bakım programlarının optimize edilmesi.	Bulut bilişim, AI, Nİ, veri analitiği, dijital çalışma alanı.
Microsoft	İnsanlar, yerler ve cihazlar arasındaki etkileşimlerin modellenmesi.	Bilgisayar yazılımı, tüketici elektroniği, kişisel bilgisayarlar.
PTC	Üretim esnekliği ve rekabet gücünün artırılması.	Nİ ve AR içeren bilgisayar yazılım ve hizmetleri.
Siemens	Plan, tasarım ve üretim sistemleri için dijital ikiz.	Enerji üretimi, iletim, telekomünikasyon, tıbbi teşhis, kontrol sistemleri.
Tesla	Her araç kimlik numarası ile fabrika arasındaki senkronize veriler.	Temiz enerji ve elektrikli araç.
Dassault Systèmes ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA)	İnsan kalbinin simüle edilerek dijital ikizin oluşturulması.	Yaşayan kalp projesi.
Myontec	İnsan kaslarındaki aktiviteyi ve egzersizlere karşı verdiği tepkileri vücudun genel sağlık durumuna göre analiz edip dijital bir ortama aktararak bu verilerin ışığında daha etkili egzersizlere karar verme.	Giyilebilir teknolojiler ve dijital ikiz entegrasyonu.
Mater Özel Hastaneleri	MPH ve Siemens Healthineers, MPH radyoloji bölümü iş birliği.	Radyoloji departmanının 3D bilgisayar modeli, nicel raporlar, farklı operasyonel senaryolar deneyebilme ve yeni düzenekleri test edebilmek için dijital ikiz.
University College London, Empirica İletişim ve Teknoloji Araştırma Şirketi Sheffield Üniversitesi, Rizzoli Ortopedi Enstitüsü ve Pompeu Fabra Üniversitesi	İnsan vücudunun dijital ikizinin yaratılması, özellikle sağlık alanında dijital hastaların oluşturularak, tıbbi kararları desteklemek için hastaya özel yapılan modelleme.	Dijital Hasta Yol Haritası Projesi.
Türkiye Çevre ve Şehircilik Bakanlığı	Akıllı şehir uygulamaları.	Akıllı binalar, akıllı hastaneler, akıllı belediyeler
Türkiye Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi Başkanlığı ve Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı	Sanayi ve Teknoloji Bakanı ve DDO Başkanı'nın Bilge ve Bilgin adında kendi yapay zekâ karakterleri ve dijital ikizleri ile sohbeti.	Türkiye'nin İlk Ulusal Yapay Zekâ Stratejisi

Kaynak: Aynacı, 2020; Bulut, 2020; Aheleroff ve diğerleri, 2021.



Ülkemizde, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından gerçekleştirilen “Kentsel Yerleşim ve Gelişme Alanlarında 3 Boyutlu Topoğrafya ve Bina Modeli Oluşturma” Projesi ile tüm şehirlerin dijital ikizleri oluşturulmuştur. Bu ikizler sayesinde afetlere önceden önlem alınacağı ve imar barışına girmeyen yapıların tespit edileceği belirtilmiştir (CSB, 2019). Yine, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ, Siemens PLM Software ile üretim tesisinde bütünsel bir dijital ikiz uygulaması için iş birliğine gitmiştir. Bu iş birliği ile karmaşık programların daha çabuk uygulamaya alınması fiziksel prototip süreçleri azalmasının ve ürünlerin pazara sunulma süresinin önemli ölçüde kısalması hedeflenmiştir (Yeşilyurt, 2018).

Yine Türkiye’de 2017 yılında Afyon Dinar’da dijital ikiz teknolojisi üzerine kurulan “Dijital Rüzgâr Çiftliği” bölgedeki 72 bin ailenin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Sistemin en önemli özelliği tribünlerin sensörlere sahip olması, akıllı özelliği taşıması ve oluşturulan sanal bir platform aracılığı ile dijital ikizi ile konuşmasıdır. Bu sayede kendisine gelen rüzgâr koşullarına göre zorlanacağı durumları dijital ikizine söylemekte, bu rüzgâr koşullarına ve hava durumuna göre kendisinde oluşabilecek arızaları haber vermekte ve destek istemektedir. Dijital ikizi ise bu verileri ve diğer ilişkili verileri analiz ederek onun ne yapması gerektiği konusunda bir karar vermektedir (Ekren, 2020).

#### 4. ÜRETİM SEKTÖRÜNDE DİJİTAL İKİZ UYGULAMALARI

Dijital ikiz, üretim sektörünün ilerlemesinde öncü bir rol üstlenmiştir (Fuller ve diğerleri, 2017). Üretim sisteminin uçtan uca entegrasyonun sağlanmasında aracı bir rol üstlenen dijital ikizler, derin öğrenme, Nİ, SFS gibi teknolojiler ile birleştiğinde işletmeler için bulunmaz bir fırsata dönüşmektedir (Kutzke ve diğerleri, 2021). Özellikle üretim eğilimlerinin hızlıca değiştiği rekabetçi pazarlarda dijital ikiz ve üretimde dijitalleşme işletmelerin daha yüksek verimlilik sonuçlarına ulaşmak için bir fırsat olarak görülmektedir. Bu fırsat dijital teknolojilerin akıllı üretim sistemlerine adaptasyonunu kolaylaştırmaktadır. Ayrıca bu teknolojiler fiziksel ürünün uzaktan algılanması, gerçek zamanlı izlenmesi ve kontrolüne olanak tanımaktadır (Negri ve diğerleri, 2017). Bu durum ise işletmelerde ortaya çıkabilecek sorunları çözmeye olanak tanıyan bir altyapı sağlamaktadır (Zhang ve diğerleri, 2021: 60).

Dijital ikizin bu potansiyel faydalarına sahip olmak için işletmelerin fiziksel nesnenin mühendislik verilerini ve operasyonel verilerini birleştirerek dijitalleştirilmesi gerekmektedir. Daha sonra dijitalleştirilen veya sayısallaştırılan bu veriler bir üretim ortamı bağlamında, sensörler, iletişim sistemleri ve gömülü sistemler, makinelere ve üretim sisteminin diğer öğelerine entegre edilmelidir. Bu şekilde toplanan verilerin bir ağ aracılığıyla fiziksel nesnenin bilgi dünyasındaki dijital temsiline aktarılması gerekir. Fiziksel sistemlerin sanal sistemler ile bu şekilde oluşturulan entegrasyonu sanal ve fiziksel sistemler arasında karşılıklı etkileşimi ortaya çıkarır ki, bu durum SFS teknolojisi olarak bilinir (Kunath ve Winkler, 2018). SFS teknolojisi Endüstri 4.0 için vazgeçilmez bir teknolojidir. Nitekim Endüstri 4.0’ın amacı fiziksel dünya ile sanal dünyayı birleştirmektir (Wang ve Wang, 2016). Bu amaca ulaşmak için dijital ikiz benzersiz bir yol sağlamaktadır (Qi ve diğerleri, 2021). Aralarındaki fark ise, dijital ikizler daha çok sanal modellere odaklanırken, SFS teknolojisi daha kapsamlı olarak bilgi işlem, iletişim ve kontrolü vurgular. Bu şekilde, fiziksel alan sanal alan tarafından gerçek zamanlı olarak entegre edilebilir, izlenebilir, kontrol ve koordine edilebilir ve bunun tersi de mümkündür (Semeraro ve diğerleri, 2021).

Dijital ikiz, özellikle akıllı üretim süreçleri açısından giderek kilit araştırma alanlarından biri haline gelmektedir (Fedorko ve diğerleri, 2021). Akıllı üretim, en gelişmiş üretimlerden biridir ve gelecekteki gelişme yönü sayesinde hep istenilen bir hedeftir. Akıllı üretime ulaşmanın yolu siber fiziksel sistemlerdir ve bu da ancak dijital ikizler ile mümkün olabilir. Hatta dijital ikizlerin akıllı üretim için bilgi entegrasyonunun kilit teknolojisi olduğuna ve daha önce akıllı üretime ulaşmak için önemli bir engel olarak görülen siber fiziksel entegrasyonun önünü açabileceğine inanılmaktadır (Shengli, 2021). Burada ideal olan dijital ikizin fiziksel karşılığı ile aynı olacak ve nesne/sistem hakkındaki tüm bilgilerin eksiksiz, gerçek zamanlı bir veri kümesine sahip olmasıdır (White ve diğerleri, 2021). Üretim ortamlarında, özellikle yüksek verimlilik için tasarım, montaj, işleme ve lojistik gibi aşamalarda dijital ikizden faydalanılmaktadır. Dijital ikizler doğru ve etkili bir şekilde kullanıldığında, üretim süreçlerini daha esnek, uyarlanabilir ve öngörülebilir hale getirmektedir (Lugaresi ve Matta, 2021). Araştırmacılar tarafından, üretim süreçlerinde dijital ikiz teknolojisinin kullanımına dair dört kategori tanımlanmıştır. Buna göre dijital ikiz ile işletmeler (Lee ve diğerleri, 2021: 87);

- Ürünleri modellemek, izlemek, test etmek, kontrol etmek ve hizmet vermek için ÜYDY’ne vurgu yapan ürün tasarımları gerçekleştirebilir.
- Sürekli ve tutarlı veri toplama ile üreticilere işin görünen ve görünmeyen yönleri hakkında şeffaf bilgi sağlayabilir. Bu bilgiler, üreticilerin verimliliklerini, hızlarını, kalitelerini vb. artırmalarına yardımcı olacaktır.

- Fiziksel sistemler ile sanal sistemler arasındaki boşluğu azaltan bir sistem entegrasyonu sağlanabilir. Bu entegrasyon sayesinde, üretimin farklı aşamalarında hem kullanıcılara hem de ürün sistemlerine yeni hizmetler sunulmaktadır.
- Ürün yaşam döngüsünün her aşamasında uyumlu ve tutarlı bir çalışma sağlamak için üretimin sürdürülebilirliğini, pazar payını, toplam geliri, müşteri memnuniyetini vb. izleyen ve gerektiğinde ayarlamalar yapan iş perspektifi sağlayabilir. Örneğin, fabrikalarda belirli işler için robotik sistem tasarlamak, dijital ikiz yaklaşımına dayalı olarak kurulabilir (Lee ve diğerleri, 2021: 88).

Dijital ikizlerin üretim atölyelerinde kullanılması ile akıllı üretimlerin gerçekleşmesi, işletmelere esneklik, kişiselleştirilmiş kitle üretim, sürdürülebilirlik ve kaliteli ürün üretimi gibi fırsatları sağlamaktadır. Bu açıdan günümüz koşulları işletmeleri dijital ikiz tabanlı akıllı üretime ve bireyselleştirilmiş üretime zorlamaktadır (Leng ve diğerleri, 2021). Bununla birlikte dijital ikiz teknolojisi ile robotik uygulamaların birlikte kullanılması, işletmeler için çok daha büyük fırsatları doğurmaktadır. Dijital ikiz ile tasarlanmış bir insan-robot iş birliği, üretim sistemine hızlı entegrasyon, üretim sürekliliği, üretimin yeniden yapılandırılması ve güvenlik doğrulanması sağlamaktadır. Daha da ileri düzeyde ise, çalışanların iş güvenliği, üretim süreçlerinde kısalma ve yüksek verimlilik bu iş birliği ile elde edilmektedir (Malik ve Brem, 2021). İnsan ve makine etkileşiminin altyapısına dijital ikiz önemli bir katkıda bulunmaktadır (Fan ve diğerleri, 2021). Son yapılan çalışmalarda, insan ve robotların birlikte çalıştığı esnek montaj hücrelerinin önemi vurgulanmaktadır (Shengli, 2021).

### 5. DİJİTAL İKİZ OLGUNLUK SÜRECİ

İşletmelerin dijital ikiz teknolojisine geçişleri için standart bir süreç bulunmamaktadır. Çünkü her işletme birbirinden farklıdır. Başka bir deyişle, her işletme benzersiz olduğundan ve kendine özgü varlıklar, süreçler ve etkileşimlerden oluştuğu için, dijital ikize geçiş için ana hatları sağlayacak tek bir standart yoktur. Bu nedenle işletmelere dijital ikiz teknolojisine geçişte, sadece dikkat edilecekleri ilkeler olduğu söylenebilir. Buna göre dijital ikiz oluştururken Parmar ve diğerleri (2020) beş ilkenin dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Bunlar;

1. Mevcut kaynakların değerlendirilmesi: İşletmenin elindeki mevcut dijital teknolojileri değerlendirmesi gerekmektedir. Bunun için işletmeler kullandıkları dijital teknolojilere ilişkin kapsamlı bir araştırma yapmalıdır.
2. Verilerin serbest bırakılması: İşletmelerin verileri genelde bilgi arşivlerinde ve depolama alanlarında saklıdır. Verilerin dijital ikize entegre edilebilmesi için bilgi depolarından kurtarılması gerekir. Veriler, başka verilerle daha fazla bağlantılı hale geldikçe değerleri artacaktır ve başka verileri de kendilerine çekecektir. Böylece veriler ne kadar serbest bırakılırsa, dijital ikizin potansiyel kapsamı o kadar büyük olacaktır.
3. Dijitalleşme sınırlarının zorlanması: İşletmelerin sürekli olarak dijitalleşme fırsatlarını kollaması, işletmesini dönüştürmesi, yeni teknolojiler konusunda kendini zorlaması gerekmektedir.
4. Yeni dijital fırsatlar aranması: İşletme içinde daha fazla yapı, süreç ve etkileşim dijitalleştirildikçe ve dijital ikiz içinde temsil edildikçe, yeni dijital fırsatlar giderek daha uygulanabilir hale gelmektedir.
5. Modellerin artırılması: Son ilke, dijital ikizin ilk bilgi, bağlam ve etki modellerinden evrimini dikkate almaktadır. İşletmelerin bu aşamada dijital ikize geçişi için modellere sahip olması gereklidir. Yeni bağlantıların, yeni verilerin, yeni süreçlerin ve yeni etkileşimlerin doğru bir şekilde modellenmesini sağlamak için dijital ikizi oluşturan bilgi, bağlam ve etki modellerinin sürekli olarak güncellenmesi ve yeniden yapılandırılması gerekir. Dijitalleştirme sınırı sürekli olarak genişletildiğinden yeni sensörler, varlıklar, süreçler ve etkileşimler sayısallaştıkça bilgi modelinin güncellenmesi gerekecektir.

Bu ilkelerin doğru bir şekilde kullanılması, dijital ikizin ortaya çıkmasını ve büyümesini sağlayabilecek dinamik bir evrim süreci ile sonuçlanabilir. Dijital ikiz işletmeler için oldukça önemlidir, çünkü dijital ikiz, Endüstri 4.0 için ana destekleyici teknolojiler olarak hizmet veren akıllı üretimi mümkün kılmaktadır. Dijital ikizler, bazı kaynaklarda dijital ikizin veri entegrasyon düzeyine ve olgunluğuna göre "Dijital Model", "Dijital Gölge" olarak da karşımıza çıkmaktadır (Fan ve diğerleri, 2021). Araştırmacılar geçiş sürecine dair, dijital ikizlerin işletmelerde olgunluğunu, Tablo 4'te görüldüğü gibi, dijital ikiz öncesi, dijital ikiz, uyarlanabilir dijital ikiz ve akıllı dijital ikiz olmak üzere dört seviyeye ayrılabilirliğini belirtmişlerdir (Singh ve diğerleri, 2021).

Tablo 4 incelendiğinde şu sonuçlar çıkarılabilir; fiziksel nesne ile dijital nesne arasında tek yönlü bir veri akışı, manuel bir model geliştirme süreci varsa dijital gölge aşamasında olduğu söylenebilir. Bu seviyede fiziksel nesnenin durumundaki bir değişiklik, dijital nesnede bir durum değişikliğine yol açar, ancak bunun tersi olmaz. Bununla birlikte, fiziksel nesne ile dijital bir nesne arasındaki veri akışı her iki yönde de tamamen entegre ve otonom model/uygulamaya sahip ise bu seviyeye dijital ikiz denilebilir. Böyle bir olgunlukta, dijital nesne aynı zamanda fiziksel nesnenin kontrol örneğidir. Fiziksel nesnenin durumundaki

bir değişiklik, doğrudan dijital nesnenin durumunda bir değişikliğe yol açar ve bunun tersi de geçerlidir (Kritzinger ve diğerleri, 2018: 1017).

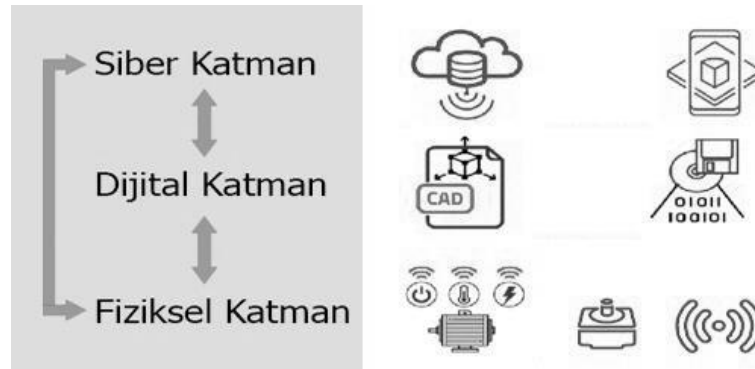
**Tablo 4. Dijital ikizler için olgunluk seviyeleri**

Seviye	Dijital İkiz Öncesi Dijital Gölge	Dijital İkiz Dijital Gölge	Uyarlanabilir Dijital İkiz	Zeki Dijital İkiz
Yaşam döngüsü	Tasarım	Tasarım ve kullanım	Kullanım	Kullanım ve evrim
Fiziksel ve Dijital İkiz Bağlantısı	Hiçbiri	Tek taraflı	İki taraflı	Çok taraflı
Uygulama Senaryoları	Kavramsal tasarım, risk değerlendirme	Detaylı tasarım, Fonksiyonel test	Operasyon optimizasyonu	Otonom kontrol
Model Geliştirme	Manuel	Ayrık	Sürekli	Otonom

Kaynak: Singh ve diğerleri, 2021.

Dijital ikizin işletmelerde kurulabilmesi için gereken teknolojiler seti büyük ölçüde farklılık göstermektedir. Genel olarak bakıldığında, sıklıkla kullanılan teknolojiler simülasyon yöntemlerini içermektedir. Bununla birlikte, dijital ikizler, iletişim protokollerine ve yaygın olarak Endüstri 4.0 teknoloji bileşenleri olarak tanımlanan (Duman ve Akdemir, 2020) diğer teknolojilere (nesnelerin interneti, bulut bilişim, büyük veri vb.) ihtiyaç duymaktadır (Kritzinger ve diğerleri, 2018). Bu açıdan işletmelerin neler yapması gerektiğine dair incelenen çalışmalarda şu ifadelerle rastlanmıştır: Dijital ikizler, doğru ve farklı küçük tipte sensörler gerektirir. Bu sensörleri değişen koşullarda yönetmek ve bakımını yapmak zorlu ve karmaşık bir süreçtir. Dijital ikizlerin kullanılan tüm teknolojileri ve platformları uzun ömürlü olmalıdır. Bu teknolojiler tasarım, simülasyon ve analitik yazılımlara sahip olmalıdır. Bu nedenle doğru teknolojilerin seçilmesi uzun vadede bir başarı göstergesidir. Yine önemli başarı göstergelerinden birisi de çalışanların dijital ikiz teknolojilerine göre eğitilmesidir. Dijital ikiz bir dizi beceriye ihtiyaç duymaktadır. Yine daha etkin bir dijital ikiz için veri yönetim sistemlerinin güvenliğini sağlamak hayati önem taşımaktadır. Son olarak, diğer teknolojiler gibi, bu büyük dijital dönüşümü kabul etmek için işletmelerin ve paydaşlarının kültür değişikliklerine ihtiyacı bulunmaktadır.

İşletmelerin dijital ikiz modelini kurarken teknoloji, yazılım, çalışan, örgüt yapısı ve örgüt kültürü ile birlikte ortak bir dönüşüm geçirmesi gerekmektedir. İşletmenin mevcut teknolojilerinin dönüşümü, dijital ikiz modeline geçişi aşamalı bir süreci karşımıza çıkarmaktadır. Özellikle kurulan modeller, yol haritaları ve her araştırma bu konuda uygulayıcılara yol göstermektedir. Kavramsal olarak bir dijital ikiz modeli Şekil 5'teki gibi gösterilmiştir.



**Şekil 5. Kavramsal dijital ikiz referans modeli (Aheleroff ve diğerleri 2021, yazar tarafından geliştirilmiştir.)**

Dijital ikiz modeli fiziksel katman, dijital katman, siber katman ve bu katmanlar arasında veri alışverişi için gerekli iletişim olmak üzere dört bölüm şeklinde kurulmaktadır. Fiziksel katmanın görevi, nesnelere, varlıklara, ürünler, personel, ekipman, tesisler, sistemler, süreçler, çevre veya kaynaklar gibi gerçek nitelikleri temsil etmektir. Dijital katman, statik veya dinamik verilerin oluşturulmasını değiştirilmesini, analizini, optimizasyonunu veya tahminini desteklemek için verilerin bilgisayar destekli tasarım (CAD) veya bilgisayar destekli üretim (CAM) gibi ham haliyle veya farklı dosya formatlarında kaydedilmesini sağlamaktadır. Tasarlanmış ve geliştirilmiş dosyaları içerir. Siber katman, buluta işleme ve depolamayı içerir. Bu katmanda teknolojilerden elde edilen veriler kullanıma hazır bilgiye dönüştürülür. Siber katman sayesinde, büyük veri, Nİ, makine öğrenme ve blockchain ile ilişkili gelişmiş özellikler nedeniyle en karmaşık üretim

paradigmalarını elde etme becerisine sahip güçlü teknolojiler ortaya çıkabilir. Üretimde ciddi bir katma değer yaratılabilir (Aheleroff ve diğerleri, 2021). Bu nedenle Zhuang ve diğerleri (2018) işletmelere, karmaşık bir ürün montaj atölyesi için dijital ikiz tabanlı bir akıllı üretim yönetimi ve kontrol çerçevesi önermiştir. Siber katman özellikle Endüstri 4.0 ile popüler olan ve bugün müşterilerin de isteklerine en uygun olan, veri gizliliği, şeffaflık, ölçeklenebilirlik ve kişiselleştirme dâhil olmak üzere çeşitli rekabet avantajları sağlamaktadır (Aheleroff ve diğerleri, 2021). İşletmeler açısından potansiyel faydalar sağlayan bu teknolojiye dair araştırma sonuçları ise aşağıdaki gibi özetlenebilir.

## 6. VERİMLİLİK TEKNOLOJİSİ OLARAK DİJİTAL İKİZ

Endüstri 4.0 ile değişen üretim anlayışı tüketicilerin beklentilerini de değiştirmiş, çeşitli ve karmaşık ürünlere talebin artmasına neden olmuştur. Bu nedenle üretim sektörü, tüketicilerine en kısa sürede ve en az maliyetle ürünleri ulaştırabilmek için bir çözüm aramaktadır. Dijital ikiz teknolojisi üretim geri bildirimlerinin yanında ürün performansı hakkında gerçek zamanlı bir izleme sağlamaktadır. Bu açıdan dijital ikiz üreticilere sorunları fark etme, tahmin etme ve olası çözümler sunma veya üreticilerin daha iyi kararlar almasına yardımcı olma yeteneği vermektedir (Zhu ve diğerleri, 2021). Özellikle üretim sürecinde dijital ikiz; üretim süreci izleme ve kontrolünde karşımıza çıkarken, ürünlerin tüm yaşam döngüsünü kapsayan ve ürün/üretim hattı tasarımı, üretim süreci ve ürün/sistem işletimi ve bakımı hakkında da bilgi vermektedir (Tao ve diğerleri, 2018). Dijital ikizi başarılı bir şekilde kullanan işletmeler planladıkları veri odaklı değer yaratma amaçlarının çoğunu gerçekleştirebilir. Dijital ikiz kullanıcılarının bu teknolojiden beklediği amaçlar şunları içermektedir (Parmar ve diğerleri, 2020: 226);

- Üretim süreçlerine dair simülasyon yöntemi ile en verimli yollar belirlendiği için maliyet tasarrufu,
- Müşteri satın alma davranışları simülasyon yöntemi ile tahmin edildiği için işletmelere rekabet avantajı,
- Örgütsel performansa etki eden kararlara dair simüle yeteneği, veri tahminlerine dayalı hızlı, hatta otomatikleştirilmiş kararlar yoluyla kurumsal çeviklik,
- Yeni ürün geliştirme, müşteri davranış simülasyonları ile birlikte kullanıldığında, müşterilerin ihtiyaçlarını en iyi şekilde karşılayan ürünler olarak sıralanabilir.

Dijital ikiz, bir ürünün tasarım aşamasından satış sonrası hizmete kadar tüm aşamalarında uygulanabilir. Ürünün genel performansı izlenebilir ve bakım ihtiyacına karar verilebilir. Ayrıca üretim faaliyetlerinin planlanmasına yardımcı olabilir. Marka sadakatini geliştirmek ve müşterilerin gereksinimlerini karşılamak için müşterilerden geri bildirim alınabilir (Deepu ve Ravi, 2021). Özellikle üretim süreçleri için dijital ikiz, optimizasyon hızını ve planlamanın doğruluğunu artırır. Örneğin Sierra ve diğerleri (2018) montaj tasarım ve planlamasını aynı anda yürütmek ve üretim kaynaklarını tek bir üretim biriminde otomatik olarak koordine etmek için bir dijital ikiz önermişlerdir. Dijital ikiz tabanlı bu üretim sisteminin, çok çeşitli ürünler üretmek için minimum yeniden yapılandırma maliyetine sahip olacağını belirtmişlerdir. Yine bu konuda, Yüksekü ve Aydın (2020) çalışmalarında maliyeti düşürmek için bir yöntem olarak dijital ikizleri önermişlerdir.

Dijital ikiz tedarik zinciri sürecinde kullanıldığında; uçtan uca birbirine bağlanmış, oldukça hızlı ve engelleri görebilen bir tedarik zincirine sahip olunabilir. Veri akışı ve paylaşımı, rekabeti, iş birliğini ve şeffaflığı kolaylaştırabilir, bu ise etkili bir tedarik zinciri ile sonuçlanabilir. Bu noktada dijital ikiz üretim sistemlerinin sürekli iyileştirilmesine yardımcı olur, inovatif yenilikleri kolaylaştırır. Farklı durumlara göre farklı senaryolar geliştirebilir. Böylece, tedarik zincirindeki tüm faaliyetler, performansı artırmak için çeşitli senaryolar dikkate alınarak değiştirilebilir (Deepu ve Ravi, 2021).

Dijital ikiz teknolojisi oluşabilecek bir ekipman arızasını tahmin etmede, ekipmanların optimum performansı düştüğünde kullanıcılara uyarı vermede ve müşterilerin deneyimlerini iyileştirmede destek olabilir (Tao ve diğerleri, 2018). Bu sayede dijital ikizler yöneticilere bireysel ve örgütsel performansı daha iyi anlama, tahmin etme ve optimize etme imkânı sağlayabilir. Parmar ve diğerleri (2020) çalışmalarında, yöneticilerle yapılan son anketlerde dijital ikizin kullanımının arttığını belirtmişlerdir. Sonuçlara göre Nİ teknolojisi kullanan işletmelerin %13' ü hâlihazırda dijital ikizleri de kullanmaktadır ve %62'si de ya dijital ikiz kullanımı kurma sürecindedir ya da bunu yapmayı planlamaktadır.

Dijital ikizler işletmelerde yenilik ve iyileştirme olanaklarını artırmaktadır. Bu nedenle, Li ve diğerleri (2021) maliyeti azaltmak ve fiziksel, siber ve sosyal alan arasında iş birliğini sağlamak için dijital bir ikizin gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca dijital ikiz, işletmelere karar desteği sağlamaktadır (Parmar ve diğerleri, 2021). Dijital ikiz, rekabet edebilirliği, üretkenliği ve verimliliği artırmaktadır (Kritzinger ve diğerleri, 2018). Bunlara ilaveten dijital ikizler güvenilir, gerçek zamanlı, şeffaf ve dijital raporlar sağlayarak işletmeler için birçok fayda sağlamaktadır. Tüm bu faydalar şu şekilde özetlenebilir (Mashaly, 2021: 301; Qi ve diğerleri, 2021);

- Gerçek zamanlı izleme, kontrol ve veri toplama; dijital ikiz aracılığıyla, fiziksel ve sanal sistem arasındaki güncellemeler gerçek zamanlı olarak takip edilebilir, bu durum iş kararları için gerekli tüm verilerin alınmasına ve gerektiğinde fiziksel sistem üzerinde kontrolüne olanak tanır.
- Yüksek kalitede tasarımlar oluşturma; tasarım sürecine modelleme ve görselleştirme aşamasında dijital ikiz diğer teknolojiler ile birleşerek (XR gibi) yüksek kaliteli bir tasarım elde edilebilir. Bu sayede dijital ikiz müşteriler, yöneticiler gibi tüm paydaşların proje modelini adım adım takip etmesine, sorunları bulmasına ve kıyaslamasına imkân tanır (Alizadehsaleh ve Yitmen, 2021).
- Uzaktan erişim ile iş sürekliliği; dijital ikize istenilen her yerden ulaşılabilir (Alizadehsaleh ve Yitmen, 2021). İşletmede olmasalar dahi dijital ikiz, ilgili tüm tarafların sisteme dâhil edilmesini ve iş birliğini garanti eder.
- Artan verimlilik; üretim sürecinde senaryoların ve vakaların test sürecini kolaylaştırarak, zaman ve maliyet tasarrufu sağlar. Dijital ikiz ayrıca, ekipman ve varlıkların ömrünü uzatabilir. Özellikle, fiziksel prototip ihtiyacı ve hata oranını azaltarak, zamandan tasarruf edilmesini sağlamaktadır.
- Yüksek karar destek sistemi; anlık verilerin toplanması, veri analizinin yapılması ve kolayca erişilebilir olması daha hızlı, daha bilgili ve daha verimli iş kararlarının alınmasını sağlar. Dijital ikiz bilgi boşluğunu azaltır. Simülasyon araçları ve sanal gerçeklik araçları aracılığıyla dijital ikiz, operatörün karmaşık fiziksel varlıklar ve süreçler hakkındaki anlayışını derinleştirerek, sağlıklı kararlar almasına yardımcı olur.
- Önleyici bakım ve optimize edilmiş zamanlama: Dijital ikiz ile yapay zekâ ve makine öğrenme teknolojilerinin entegrasyonu ile kesintiler önceden tahmin edilebilir. Bu durum çalışanların farkındalığını artırarak, değişebilen koşullarla ilgili çalışmalarını iyileştirip, geleneksel çalışma yaklaşımlarına değer katabilir. Ayrıca, dijital ikiz arızaların ortaya çıkmadan önlenmesinde ve tespit edilmesinde, sistemin ya da ürünün uzaktan izlenmesinde, oluşan problemlerin uzaktan çözüme ulaştırılmasında ve uyarı sistemlerinin geliştirilmesinde önemli faydalar sağlayabilir (Cybermag, 2020).
- Gelişmiş risk değerlendirme; dijital ikiz, fiziksel sistemi etkilemeden problemler ortaya çıkmadan çeşitli çözümlerin sanal olarak test edilmesine olanak tanır. Duyusal veri toplama, büyük veri analitiği, yapay zekâ ve makine öğrenimi ile birlikte dijital ikiz, izleme, teşhis, prognostik ve optimizasyon için kullanılabilir.
- Dijital ikiz, çalışanların, operatörlerin, bakımçıların ve hizmet sağlayıcıların eğitimi için kullanılabilir. Bu açıdan dijital ikiz, eğitim yöntemlerini daha yaratıcı ve gerçeğe yakın hale getirebilir. Örneğin, Türkiye'nin ilk Ulusal Yapay Zekâ Stratejisi açıklanırken konuşmacıların dijital ikizleri ile sohbetine yer verilmiştir (Ekonomist, 2021).

Dijital ikiz uygulamalarının faydaları arasında azaltılmış üretim süreleri ve maliyetleri, farklı teknolojileri kullanma karmaşıklığını ortadan kaldırma, daha güvenli çalışma ortamları yaratma ve çevresel açıdan daha sürdürülebilir operasyonlar oluşturma da sayılabilir. Dijital ikizler, Siemens gibi birçok önde gelen işletme ve kuruluş tarafından bu potansiyel faydaları için kullanılmaktadır (Negri ve diğerleri, 2017).

Tabi her yenilik ve dönüşümde olduğu gibi, işletmelerin dijital ikiz teknolojisi konusunda çeşitli zorluklarla karşı karşıya olduğu açıktır. Her şeyden önce işletmeler dijital ikizi etkili bir şekilde kullanabilmek için veri yönetimi ve Nİ kullanımını kolaylaştıran bir altyapıya ihtiyaç duymaktadır. Dijital ikiz ile ilgili bir sonraki zorluk, veri gereksinimleridir. Dijital ikiz sabit, kesintisiz bir veri akışı için, veri kalitesi gerektirir. Veriler tutarsız ve eksik olduğunda, dijital ikiz risk taşıyabilir ve yanlış tahmin yapabilir. Bir diğer zorluk ise güvenlik ve gizlilik. Bu zorluğu ortadan kaldırmak için işletmeler, dijital ikiz, Nİ ve veri analitiğini kolaylaştıran teknolojilerin gizlilik ve güvenlik düzenlemeleri ile çeşitli uygulamaları ve güncellemeleri takip etmesi gerekmektedir (Mathupriya ve diğerleri, 2020). Bu konuda VanDerHorn ve Mahadevan (2021), çalışmalarında dijital ikiz uygulama zorluklarını ve fırsatlarını şu şekilde sınıflandırmış ve tavsiyede bulunmuşlardır;

- Terminoloji: İşletme içinde ve dışında daha etkili bir iletişim sağlamak ve ortak bir anlayışı kolaylaştırmak için açık ve tutarlı bir terminoloji tanımlanmalıdır. Aksi takdirde amaçlar ve yapılması gerekenler yanlış anlaşılabilir.
- Standardizasyon: Veri elde etmeden tahmin etmeye ve sonucunda karar vermeye kadar tüm teknolojilerin standartlaştırılması gerekir. Uygulamalara bakıldığında, standart geliştirme süreci genellikle yavaştır ve bu da dijital ikizlerin geniş ölçekte benimsenmesinin yavaşlamasına neden olmaktadır.
- Organizasyon kültürü: Çalışanların, ortakların ve diğer paydaşların arasında ortak bir iş birliği gereklidir. Paydaşlar arasında gerçeğe uygun değer, veri güvenliği ve fikri mülkiyet hakları sağlanmalıdır. İşletmelerde dijital dönüşümü kolaylaştıran bir kültür olmalıdır.

- Teknoloji olgunluğu: Dijital ikizler farklı teknolojilerin bir araya gelmesi ile ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle işletmelerin en ideal olgunluk için mevcut teknolojilerinin olgunluğunu göz önünde bulundurarak, verimlilik ve etkinlikte en anlamlı artışları sunan teknolojilere öncelik vermesi gerekmektedir.
- Doğrulama ve geçerlilik: Dijital ikiz, farklı teknoloji ve süreçlerin entegrasyonundan oluşur. Her işletmenin kaynakları, çalışanları ve teknolojileri birbirinden farklı olduğu için tek bir örnek, tam sistem modelini doğrulamak mümkün olmayabilir.
- Otomasyon: Dijital ikiz otomasyonu artırarak manuel emeği azaltır. Amaç yüksek otomasyondur, fakat üretim sürecindeki insana dair hala güçlü bir güven vardır.

## 7. SONUÇ

Akıllı işletmelerin temelinde “bağlantı” çıktısında “anlamlı veri” yatmaktadır (Apillioğulları, 2019). Bugün tüm dünyada dijital dönüşüm konusunda bir fikir birliği bulunmaktadır. Birçok işletme sorunları tespit etmek ve verimliliği ve kaliteyi artırmak amacıyla dijital dönüşümü felsefe edinmiş, dönüşüm teknolojilerine yatırım yapmaya başlamıştır. Bu teknolojilerin gelişmesine bağlı olarak, özellikle nesnelerin interneti, bulut bilişim, büyük veri ve yapay zekâ gibi yeni nesil bilgi teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla birlikte dijital dönüşüm süreci büyük ölçüde hızlanmıştır. Üstelik bu hızlanış dijital ikizler sayesinde tüm sektörlerde inovasyon hızı da artmıştır (Qi ve diğerleri, 2021). Nitekim Thinktech’ye göre (2020) Nİ teknolojilerini kullanan yöneticilerin bir sonraki adımı dijital ikizlerdir. Dijital ikizler sahip oldukları potansiyel faydaları ile işletmeleri ve yöneticileri kendine çekmektedir ki, dijital ikizleri kullanarak yöneticilerin amacı geleceği en iyi şekilde tahmin edebilmek ve doğru planlamaları yapabilmektir. Bu açıdan dijital ikizler sadece bir görselleştirme aracı değil, doğru ve hızlı karar verme teknolojisidir. Hem üretim öncesinde hem de üretim sonrasında önleyici bir kalite aracıdır. Dolayısıyla Türkiye’nin dijital dönüşüm yolculuğunda, işletmelerin akıllı üretim sürecinde dijital ikizleri kullanması oldukça mantıklıdır. Yaratıcılığı, esnekliği, inovasyonu, çevikliği ve verimliliği artıran bu teknoloji uluslararası bir rekabet aracıdır. Dolayısıyla, dijital ikiz teknolojisi ve işlevleri verimlilik göstergeleri ile yakından ilişkilidir. Dijital ikiz sahip olduğu potansiyel faydalar ile hem çalışan emeğinin hem kullanılan ham maddelerin hem de üretim alanının verimli bir şekilde kullanılmasına katkı sağlamaktadır. Bunu sağlarken en optimal enerji ve sermaye ile en kaliteli sonuçlara ulaşmayı hedeflemektedir. Nitekim dijital ikiz toplam verimlilik ile önemli bir ilişkiye sahiptir. Bu ilişki ve ilişkinin derecesi, incelenen tüm araştırmaların sonucunda Tablo 5’teki matris şeklinde özetlenebilir.

**Tablo 5. Dijital ikiz kavramı ve işlevleri ile verimlilik göstergeleri ilişki matrisi**

Verimlilik Göstergeleri	Gerçek zamanlı izleme ve kontrol				Sistem entegrasyonu	Yaratıcı ve inovatif çalışma ortamı ve Risk değerlendirme		
	Uzaktan erişim ile çalışma	Karar destek sistemi	Önleyici bakım ve kestirim	Yaratıcı ve inovatif çalışma ortamı ve eğitimleri		Optimal kaynak ve zaman kullanımı		
Çalışan verimliliği	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta	Yüksek	Orta	Orta
Ham madde verimliliği	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Alan verimliliği	Orta	Orta	Düşük	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta	Yüksek
Enerji verimliliği	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Makine verimliliği	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Sermaye verimliliği	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Toplam verimlilik	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek

Tablo 5 ile ifade edilmek istenen; çalışan, ham madde, alan, enerji, makine, sermaye verimliliği ile dijital ikiz kavramının temel özellikleri ve işlevleri arasındaki ilişkinin düzeyini belirtmektir. Örneğin, gerçek zamanlı izleme ve kontrol ile makine verimliliği arasında yüksek bir ilişkinin olduğu düşünülmektedir. Bu matris, incelenen tüm çalışmaların sonucunda yazara ait olan fikirlerin bir sonucudur. Gelecek araştırmalarda istatistiksel olarak kanıtlanmaya açıktır. Nitekim bu çalışma ile dijital ikiz konusunda hem araştırmacılara hem de işletmelere bilgi vermek ve yeni araştırmaları teşvik etmek amaçlanmıştır.

Araştırma sonucunda elde edilen tüm bu bulguların yanı sıra araştırmanın birtakım sınırlılıkları bulunmaktadır. İlk olarak dijital ikiz ile ilgili yabancı ve yerli literatürde araştırma sayısı henüz yeterli değildir. Özellikle yerli literatürde önemli bir boşluk bulunmaktadır. Bu durum Türkiye'deki dijital ikiz uygulamalarını ve sonuçlarını görmeyi kısıtlamaktadır. İkinci olarak dijital ikiz teknolojisinin kullanım düzeyi ülkemiz açısından düşüktür. Bu durum dijital ikiz teknolojisine yatırım yapma ve oluşturmanın zorluğundan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle araştırmada herhangi bir uygulamaya yer verilememiştir. Dijital ikiz ile verimlilik arasında belirtilen ilişkinin uygulamalar ile istatistiksel olarak ispatlanması gerekmektedir. Son olarak bu çalışma sadece üretim sektöründeki işletmeleri esas alarak yorumlanmıştır. Dijital ikiz teknolojisi ve hizmet işletmelerinin verimlilikleri ile ilgili farklı çalışmalarla desteklenebilir. Lu ve diğerlerine göre (2020) uygulamada güvenilir bir dijital ikiz oluşturmanın zor olması nedeniyle araştırmaların sürekliliği önemlidir. Araştırmacılar bu konuda, dijital ikiz uygulama araştırmalarına odaklanırken, standartlar, iletişim protokolleri, zamana duyarlı veri işleme ve güvenilirlik konusundaki araştırmaların gelecek araştırmalar için öncelik taşıdığını belirtmektedir. Ayrıca, gelecek araştırmalarda dijital ikiz kullanımının yaygınlaşmasına bağlı olarak işletmelerin elde ettikleri verimlilik sonuçlarına dair çalışmalar daha teşvik edici olacaktır. Dijital ikiz konusunda rol model olan işletmelerin sayısının artması, küçük girişimlere, özellikle KOBİ'lere cesaret verecektir. Yine gelecek araştırmalarda dijital ikiz teknolojisi ile yaratıcılık, inovasyon, performans, kalite, akıllı üretim, maliyet ve eğitim gibi değişkenler ilişkilendirilerek daha farklı sonuçlara ulaşılabılır. Yapılan her araştırmanın Türkiye'nin Endüstri 4.0 yolculuğunda önemli bir katkısı olacağı açıktır. Dijital ikiz teknolojisi geleceğin en önemli teknolojilerinden birisidir ve işlenmeye, araştırılmaya ve öğretilmeye ihtiyacı bulunmaktadır.

## KAYNAKÇA

- Aheleroff, S., Xu, X., Zhong, R. Y. ve Lu, Y. (2021). "Digital Twin as a Service (Dtaas) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model", *Advanced Engineering Informatics*, 47, 101225.
- Alizadehsalehi, S. ve Yitmen, I. (2021). "Digital Twin-Based Progress Monitoring Management Model Through Reality Capture to Extended Reality Technologies (DRX)", *Smart and Sustainable Built Environment*, DOI: 10.1108/SASBE-01-2021-0016.
- Apillioğulları, L. (2019). "Dijital Dönüşüm: Akıllı Fabrikalar", *Aura Kitapları*, İstanbul.
- Aydın, Ö., ve Karaarslan, E. (2020). "Covid-19 Belirtilerinin Tespiti İçin Dijital İkiz Tabanlı Bir Sağlık Bilgi Sistemi", *Online International Conference of COVID-19 (CONCOVID)*, İstanbul.
- Aynacı, İ. (2020). "Dijital İkiz ve Sağlık Uygulamaları", *İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 3(1), 70- 82.
- Basl, J. (2016). "The Pilot Survey of The Industry 4.0 Principles Penetration in the Selected Czech and Polish Companies", *Journal of Systems Integration*, 7(4), 3-8.
- Boschert, S. ve Rosen, R. (2016). "Digital Twin-the Simulation Aspect", *Mechatronic Futures*, Springer, Cham.
- Bulut, T. (2020). "İnsanın Dijital İkizi Oluşturulabilir Mi?", <https://www.sanayigazetesi.com.tr/insanin-dijital-ikizi-olusturulabilir-mi-makale,1842.html>, (Erişim tarihi 26.08.2021).
- Ceylan, E.Z. (2019). "Dijital İkizler ve İnşaat Sektöründeki Yeri", *Yapı Bilgi Modelleme*, 1(2), 53-61.
- Cybermag (2020). "Dijital İkiz Nedir, Faydaları Nelerdir?", <https://www.cybermagonline.com/dijital-ikiz-nedir-faydalanerlerdir>, (Erişim tarihi 26.07.2021).
- Deepu, T.S. ve Ravi, V. (2021). "Exploring Critical Success Factors Influencing Adoption of Digital Twin and Physical Internet in Electronics Industry Using Grey-DEMATEL Approach", *Digital Business*, 1(2), 100009.
- Deng, T., Zhang, K. ve Shen, Z.J.M. (2021). "A Systematic Review of a Digital Twin City: A New Pattern of Urban Governance toward Smart Cities", *Journal of Management Science and Engineering*, 6(2), 125-134.
- Dönençark, M. ve Tecim, V. (2020). "Kurumsal Karar Destek Sistemlerinde Yapay Zekâ Kullanımı: Tasarım ve Uygulama", *Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi*, 6(2), 77-103.
- Duman, M.C. ve Akdemir, B. (2021). "A Study to Determine the Effects of Industry 4.0 Technology Components on Organizational Performance", *Technological Forecasting and Social Change*, 167, 120615.
- Ekonomist (2021). "Türkiye'nin Yapay Zekâ Stratejisi Açıklandı", <https://www.ekonomist.com.tr/ekonomist/turkiyenin-yapay-zekâ-stratejisi-aciklandi.html>, (Erişim tarihi 28.08.2021).
- Ekren, G. (2020). "Dijital İkiz (Digital Twin) Teknolojisi", <https://www.datasciencearth.com/dijital-ikiz-digital-twin-teknolojisi/>, (Erişim tarihi 29.07.2021).
- Erturan, İ. ve Ergin, E. (2018). "Dijital Denetim ve Dijital İkiz Yöntemi", *Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi*, 20(4), 810-830.
- Faller, C. ve Feldmuller, D. (2015). "Industry 4.0 Learning Factory for Regional SMEs", *Procedia CIRP*, 32, 88-91.
- Fan, Y., Yang, J., Chen, J., Hu, P., Wang, X., XU, J. ve Zhou, B. (2021). "A Digital-Twin Visualized Architecture for Flexible Manufacturing System", *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 176-201.
- Fedorko, G., Molnár, V., Vasiľ, M. ve Salai, R. (2021). "Proposal of Digital Twin for Testing and Measuring of Transport Belts for Pipe Conveyors within the Concept Industry 4.0", *Measurement*, 174, 108978.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C. ve Barlow, C. (2020). "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research", *IEEE Access*, 8, 108952-108971.
- Glaessgen, E. ve Stargel, D. (2012). "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles", 53. AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Honolulu, Hawaii.
- Göçen, S. (2020). "Açık ve Uzaktan Öğrenmede Dijital İkiz Teknolojisinin Kullanımına İlişkin Bir Değerlendirme", *Açıköğretim Uygulamaları ve Araştırmaları Dergisi*, 6(4), 155-173.
- Grievess, M. (2014). "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication", Working Paper.
- Grievess, M. (2016). "Origin of the Digital Twin Concept", *Florida Institute of Technology*, Working Paper.
- Grievess, M. (2019). "Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins", *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*, DOI: 10.2514/5.9781624105654.0175.0200.
- Grievess, M. ve Vickers, J. (2017). "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems", *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer, Cham.



- Handan, İ., I. (2021). "2021'de Dijital İkiz Uygulamaları ile En Büyük Kazanç Sağlayacak İlk Beş Sektör", <https://dijitalis.com/blog/2021de-dijital-ikiz-uygulamaları-ile-en-buyuk-kazanc-saglayacak-ilk-bes-sektor/>, (Erişim Tarihi 26.07.2021).
- Kaewunruen, S., Rungskunroch, P. ve Welsh, J. (2019). "A Digital-Twin Evaluation of Net Zero Energy Building for Existing Buildings", *Sustainability*, 11, 159.
- Kahlen F.J., Flumerfelt S. ve Alves A. (2017). "Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches", Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. ve Sihn, W. (2018). "Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification". *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022.
- Kunath, M. ve Winkler, H. (2018). "Integrating the Digital Twin of the Manufacturing System into a Decision Support System for Improving the Order Management Process", *Procedia CIRP*, 72, 225-231.
- Kutzke, D. T., Carter, J. B. ve Hartman, B. T. (2021). "Subsystem Selection for Digital Twin Development: A Case Study on an Unmanned Underwater Vehicle", *Ocean Engineering*, 223, 108629.
- Lee, J., Azamfar, M. ve Bagheri, B. (2021). "A Unified Digital Twin Framework for Shop Floor Design in Industry 4.0 Manufacturing Systems", *Manufacturing Letters*, 27, 87-91.
- Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q. ve Chen, X. (2021). "Digital Twins-Based Smart Manufacturing System Design in Industry 4.0: A Review", *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 119-137.
- Li, M., Li, Z., Huang, X. ve Qu, T. (2021). "Blockchain-Based Digital Twin Sharing Platform for Reconfigurable Socialized Manufacturing Resource Integration", *International Journal of Production Economics*, 108223.
- Lu, Y., Liu C., Wang K.K., Huang H. ve Xu X. (2020). "Digital Twin-Driven Smart Manufacturing: Connotation, Reference Model, Applications and Research Issues", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837.
- Lugaresi, G., ve Matta, A. (2021). "Automated Manufacturing System Discovery and Digital Twin Generation", *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 51-66.
- Malik, A. A. ve Brem, A. (2021). "Digital Twins for Collaborative Robots: A Case Study in Human-Robot Interaction", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 68, 102092.
- Mashaly, M. (2021). "Connecting the Twins: A Review on Digital Twin Technology & Its Networking Requirements", *Procedia Computer Science*, 184, 299-305.
- Mathupriya, S., Banu, S. S., Sridhar, S. ve Arthi, B. (2020). "Digital Twin Technology on IoT, Industries & Other Smart Environments: A Survey", *Materials Today: Proceedings*, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.358.
- Meissner, H., Ilse R. ve Aurich J.C. (2017). "Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0", *Procedia CIRP*, 62, 165-169.
- Negri, E., Fumagalli, L. ve Macchi, M. (2017). "A Review of the Roles of Digital Twin in SFS-Based Production Systems", *Procedia Manufacturing*, 11, 939-948.
- Özen, A. ve Gürel, F.N. (2020). "Kamu Denetiminde Dijital Dönüşüm: Dijital İkiz Yöntemi", *İzmir Sosyal Bilimler Dergisi*, 2(1), 16-23.
- Öztürk, G.B. (2021). "Digital Twin Research in the AECO-FM Industry", *Journal of Building Engineering*, 40, 102730.
- Parmar, R., Leiponen, A. ve Thomas, L.D. (2020). "Building an Organizational Digital Twin", *Business Horizons*, 63(6), 725-736.
- Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y. ve Nee, A.Y.C. (2019). "Enabling Technologies and Tools for Digital Twin", *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3-21.
- Rosar, R., Gollner D., Bernijavoz R., Kaiser L. ve Dumitretcu R. (2021). "Towards Collaborative Life Cycle Specification of Digital Twins in Manufacturing Value Chains", *Procedia CIRP*, 98, 229-234.
- Sayer, S. ve Ülker, A. (2014). "Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi", *Mühendis ve Makina*, 55(657), 65-72.
- Schroeder, G. N., Steinmetz, C., Pereira, C.E. ve Espindola, D.B. (2016). "Digital Twin Data Modeling with Automation ML and a Communication Methodology for Data Exchange". *IFAC Papers OnLine*, 49(30), 12-17.
- Schwab, K. (2016). "Dördüncü Sanayi Devrimi", *World Economic Forum*, Optimist Yayınları, İstanbul.
- Scime, L., Singh, A. ve Paquit, V. (2021). "A Scalable Digital Platform for the Use of Digital Twins in Additive Manufacturing", *Manufacturing Letters*, DOI: 10.1016/j.mfglet.2021.05.007.
- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., ve Dassisti, M. (2021). "Digital Twin Paradigm: A Systematic Literature Review", *Computers in Industry*, 130, 103469.
- Shaw, K. ve Fruhlinger, J. (2019). "What is a Digital Twin? And How It's Changing IoT, AI and More", <https://www.networkworld.com/article/3280225/what-is-digital-twin-technology-and-why-it-matters.html>, (Erişim tarihi 27.07.2021).

- Shengli, W. (2021). "Is Human Digital Twin Possible?", *Computer Methods and Programs in Biomedicine Update*, 1, 100014.
- Sierla, S., Kyrki, V., Aarnio, P. ve Vyatkin, V. (2018). "Automatic Assembly Planning Based on Digital Product Descriptions", *Computers in Industry*, 97, 34-46.
- Singh, S., Weeber, M. ve Birke, K. P. (2021). "Advancing Digital Twin Implementation: A Toolbox for Modelling and Simulation", *Procedia CIRP*, 99, 567-572.
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., ve Sui, F. (2018). "Digital Twin-Driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9-12), 3563-3576.
- Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B. ve Nee, A.Y. (2019). "Digital Twin-Driven Product Design Framework", *International Journal of Production Research*, 57(12), 3935-3953.
- TC. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2019). "Şehirlerin "Dijital İkizi" ile Afetlere Önlem Alınacak", <https://www.csb.gov.tr/sehirlerin-dijital-ikizi-ile-afetlere-onlem-alinacak-bakanlik-faaliyetleri-29645>., (Erişim tarihi 26.07.2021).
- Thinktech STM (2020). "Dijital İkiz Teknolojileri ve Üretime Faydaları", [https://thinktech.stm.com.tr/uploads/raporlar/pdf/952019111434675\\_stm\\_blog\\_dijital\\_ikiz\\_teknolojileri.pdf](https://thinktech.stm.com.tr/uploads/raporlar/pdf/952019111434675_stm_blog_dijital_ikiz_teknolojileri.pdf), (Erişim tarihi 26.07.2021).
- Vanderhorn, E. ve Mahadevan, S. (2021). "Digital Twin: Generalization, Characterization and Implementation", *Decision Support Systems*, 145, 113524.
- Wang, L. ve Wang, G. (2016). "Big Data in Cyber-Physical Systems, Digital Manufacturing and Industry 4.0", *I.J. Engineering and Manufacturing*, 4, 1-8.
- White, G., Zink, A., Codecá, L. ve Clarke, S. (2021). "A Digital Twin Smart City for Citizen Feedback", *Cities*, 110, 103064.
- Yeşilyurt, E.F. (2018). "TAI Dijital Dönüşümde Siemens'i Tercih Etti", <https://www.aa.com.tr/tr/sirkethaberleri/bilisim/tai-dijital-donusumde-siemens-i-tercih-etti/645365>, (Erişim tarihi 26.07.2021).
- Yükcü, S. ve Aydın, Ö. (2020). "Maliyet Düşürme Yöntemi Olarak Dijital İkiz", *Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi*, 22(3), 563-579.
- Yükcü, S., Aydın Ö. ve Koçakoğlu, Ü.Ö. (2020). "Bağımsız Denetimde Dijital İkiz Uygulaması", *Mali Çözüm Dergisi/Financial Analysis*, 30(161), 13-26.
- Zhang, J., Deng, T., Jiang, H., Chen, H., Qin, S. ve Ding, G. (2021). "Bi-Level Dynamic Scheduling Architecture Based on Service Unit Digital Twin Agents", *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 59-79.
- Zheng, Y., Yang, S., ve Cheng, H. (2019). "An Application Framework of Digital Twin and Its Case Study", *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1141-1153.
- Zhu, Z., Xi, X., Xu, X. ve Cai, Y. (2021). "Digital Twin-Driven Machining Process for Thin-Walled Part Manufacturing", *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 453-466.
- Zhuang C., Liu J. ve Xiong, H. (2018). "Digital Twin-Based Smart Production Management and Control Framework for the Complex Product Assembly Shop-Floor", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1-4), 1149-1163.