

ÜRETİMDE DİJİTAL İKİZLERİN KULLANIMI: ISO 23247 STANDARDI

Orhan ENGİN^{*1}, Kadircan Muhammet YAZICI¹, Emre YAŞA¹, Furkan ÇAKIRKÖY¹

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü

ÖZ

Dijital ikiz, fiziksel ve dijital sistemler arasında, sürekli veri akışı ve senkronizasyon sağlayarak, süreçlerin izlenmesini, optimize edilmesini ve hata tahminini mümkün kılan bir Endüstri 4.0 teknolojisidir. Dijital İkiz (Dİ) teknolojisi, Siber-Fiziksel Sistemler (SFS) ve akıllı üretim süreçlerinin izlenmesi ve kontrol edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Hem akademik hem de endüstriyel alanda yaygın olarak araştırılan Dİ'ler, akıllı üretimde kritik bir teknoloji olarak görülmektedir. ISO 23247 standardı, üretimde dijital ikizler için varlık tabanlı bir referans modeli ve işlevsel varlıklar açısından tanımlanan işlevsel bir bakış açısını içeren bir referans mimari önermektedir. Bu çalışmada, Dİ'lerin, Endüstri 4.0 ve 5.0 sürecinde kullanımı ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Dİ'ler için önerilen ISO 23247 standardı açıklanmış ve kullanımı ile sağladığı katkılar araştırılmıştır. Dijital İkizler 'in araştırma ve sanayide, otomotiv, biyoloji, tıp ve üretim gibi birçok alanda Siber-Fiziksel Sistemleri izlemek ve kontrol etmek için kullanıldığı çalışmalar analiz edilmiştir. Dİ'lerin Siber-Fiziksel Üretim Sistemleri'ni iyileştirmek için kullanıldığı belirlenmiştir. Dijital ikizlerin, karmaşık durumlarda karar destek aracı olarak kullanılabileceği, gerçek sistem davranışını tahmin edebileceği ve çözüm arayışlarında yardımcı olabileceği belirlenmiştir. Dijital ikizlerin, sistemlerin gelecekteki durumlarını anlamak için gerekli veriyi sağlayabilmesi ve sanal sistemle gerçek sistemi senkronize edebilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Dijital ikizler, otomasyonun yüksek olduğu ortamlarda daha etkili uygulanabileceği belirlenmiştir. Dijital ikizlerle ilgili pratik zorlukların; güvenli veri toplama, işleme, modelleme ve karar yorumlama süreçlerindeki riskler, uzman personel eksikliği ile özellikle KOBİ'ler için yüksek maliyetler olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dijital İkiz, Endüstri 4.0 ve 5.0, ISO 23247 Standardı, Akıllı Fabrika, Arttırılmış Gerçeklik, Sanal Gerçeklik, Simülasyon.

USE OF DIGITAL TWINS IN PRODUCTION: ISO 23247 STANDARD

Extended Abstract

Digital twin is an Industry 4.0 technology that enables monitoring, optimizing, and error prediction of processes by providing continuous data flow and synchronization between physical and digital systems. Digital Twin (DT) technology plays an important role in monitoring and controlling Cyber-Physical Systems (CPS) and smart manufacturing processes. DTs, which are widely researched in both academic and industrial fields, are seen as a critical technology in smart manufacturing. In manufacturing environments, digital twin frameworks are often used in Product Lifecycle Management, machine tool cyber twins and robotic assembly applications, in many sectors such as security, construction, transportation and healthcare, to simplify product maintenance, reduce costs and increase safety standards. Although the concept of digital twins has attracted great interest in academic and industrial fields, it poses some challenges, especially for small and medium-sized enterprises (SMEs). The most important of these challenges is that the terminology and application standards for digital twins are not yet fully established. For digital twins to be widely used in production, standardized definitions, common terminologies and application frameworks are needed. To address these needs, ISO 21597, developed by the International Organization for Standardization (ISO), provides data containers and connectivity, while ITU-T Y.3090 and ISO 23247 provide frameworks that support the process of creating digital twins. The ISO 23247 standard was

published in 2020 by the ISO TC 184/SC 4 committee to support the development of digital twins in manufacturing applications. The standard provides a comprehensive architectural framework for the creation of digital twins and provides an adaptable structure for different types of manufacturing. The ISO 23247 standard proposes a reference architecture for digital twins in manufacturing, including an asset-based reference model and a functional perspective defined in terms of functional assets. Digital twins can be used for different purposes.

DTs provide bidirectional and automatic data flow with physical systems, reflecting the current state of the system and predicting and optimizing performance. Discrete Event Simulation (DES) is a widely used technique for the analysis and optimization of industrial systems. DES models simulate the operation of real systems by monitoring the interactions between various events and the system state at discrete times. These traditional applications of simulation are based on creating a static model and performing analyses on it, and the model is usually retired after a single analysis. In this research, studies in the literature on the use of DTs in the Industry 4.0 and 5.0 process were examined.

It has been observed that the practical difficulties associated with digital twins are the risks in secure data collection, processing, modelling and decision interpretation, the lack of expert personnel and the high costs, especially for SMEs.

The lack of standards regarding the terms, architecture and models for DTs leads users to understand DTs differently when developing applications that enable DTs, making it difficult to connect data, models and services across different companies or domains. Therefore, developing DTs according to standardized reference architectures is a future necessity to ensure their adoption and facilitate their creation, processing and integration.

Keywords: Digital Twin, Industry 4.0 and 5.0, ISO 23247 Standard, Smart Factory, Augmented Reality, Virtual Reality, Simulation.

1.GİRİŞ

Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde dijital dönüşümün sağlanmasıyla birlikte, talebe dayalı hizmetlerin gerçekleştirilmesini, yenilikçi teknolojilerin kullanımını ve akıllı sistemlerin geliştirilmesini ön plana çıkarmaktadır. Bu bağlamda, Nesnelerin İnterneti (IoT), Siber-Fiziksel Sistemler, bulut bilişim ve büyük veri analitiği gibi ileri teknolojilerin entegrasyonu ile üretim süreçlerinde verimlilik, esneklik ve rekabet avantajı elde edilmektedir (Manzak vd., 2023; Aydoğmuş vd., 2021). Endüstri 4.0'ın temel hedefleri arasında, üretim süreçlerinin otomasyonu, üretimde kalite artışı, esneklik sağlanması ve maliyetlerin azaltılması gibi unsurlar yer almaktadır. Ancak bu hedeflere ulaşırken, özellikle insan ve makine arasındaki etkileşimin karmaşıklığı, yönetilmesi gereken önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle standartlaştırılmış, entegre ve birleşik mimarilerin geliştirilmesi önem kazanmaktadır.

Diğer taraftan Endüstri 5.0 yaklaşımı, teknolojik ilerlemeyi yalnızca ekonomik ve üretim odaklı bir çerçevede değil, insan merkezli bir perspektifle ele almaktadır. Bu yaklaşımın temel amacı, teknolojinin insan refahını artıran ve sürdürülebilir kalkınmayı destekleyen bir araç olarak kullanılmasını sağlamaktır. Endüstri 5.0, insan-teknoloji iş birliğini teşvik etmekte ve üretim süreçlerinin daha duyarlı, sürdürülebilir ve sosyal yönü güçlü hale getirilmesini hedeflemektedir (Yiğit vd., 2025). Bu bağlamda, işletmeler, bireyselleştirilmiş üretim modellerine odaklanmakta ve veri odaklı çözümler kullanarak müşteri ihtiyaçlarını daha etkin karşılamaya çalışmaktadırlar.

Dijital dönüşüm sürecinde önemli bir rol üstlenen Dijital İkiz (Digital Twin-Dİ) teknolojisi, fiziksel sistemlerin veya varlıkların dijital ortamdaki sanal temsilini ifade eder ve fiziksel dünya ile dijital dünya arasında sürekli ve çift yönlü veri akışını mümkün kılar (Risling vd., 2023). Dİ, Endüstri 4.0 teknolojilerinin bir bileşeni olarak, fiziksel varlıkların dijital temsillerini sunarak karmaşık iş problemlerini akıllı üretim sistemlerinde, öğrenme tabanlı algoritmalar yardımıyla çözmeyi ve verimliliği artırmayı amaçlar (Engin vd., 2024) Ancak, mevcut sistemlerde fiziksel ve dijital dünya arasındaki uyumsuzluk, verimlilik ve sürdürülebilirliği olumsuz etkileyebilmektedir (Aheleroff vd., 2021).

Dijital İkiz kavramı ilk olarak Grieves tarafından, 2003 yılında tanımlanmış, NASA tarafından 2010 yılında kullanılmaya başlanmış ve havacılık, otomotiv, sağlık gibi birçok sektörde geniş çapta benimsenmiştir (VanDerHorn vd., 2021). Dijital ikizlerin üç temel bileşeni vardır: fiziksel ürün, sanal ürün ve bunlar arasındaki bağlantılar. Dijital İkiz teknolojisinin kullanımıyla üretim süreçlerinde, maliyetlerin azaltılması, süreç optimizasyonu, bakım planlamasının iyileştirilmesi ve gerçek zamanlı izleme gibi birçok avantaj elde edilmektedir. Ayrıca, insan-robot etkileşimi, ergonomik değerlendirme ve üretim hatlarının verimliliğinin artırılması gibi alanlarda önemli gelişmeler sağlanmaktadır (Farhadi vd., 2022). Dijital ikizler, Veri Yönetim Sistemi (VYS) aracılığıyla, fiziksel süreçlerdeki ürün kusurları, süreç sapmaları ve performans sorunlarını analiz

ederek optimizasyon fırsatları sunmaktadır (Risling vd., 2023). Ancak Dijital İkiz teknolojisinin sağladığı bu avantajların elde edilmesi için sistemlerin güvenilirlik, doğruluk ve geçerlilik açısından güçlü olması gerekmektedir. Bu nedenle doğrulama, geçerlilik ve belirsizlik yönetimi süreçlerinin titizlikle yürütülmesi, dijital ikizlerin başarılı bir şekilde uygulanması için kritik önem taşımaktadır (Shao vd., 2023). Ayrıca fiziksel ve dijital dünya arasındaki uyumsuzluklar ve standart eksikliği, bu teknolojilerin yaygınlaşmasını sınırlandıran önemli engeller arasında yer almaktadır (Ahleroff vd., 2021).

Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin (KOBİ'ler), dijital ikizleri uygularken karşılaştıkları en büyük zorluk, ortak bir terminoloji ve standart çerçevenin olmamasıdır. Bu durum, işletmelerin teknoloji adaptasyon süreçlerini yavaşlatmakta ve karmaşıklştırmaktadır. Bu sorunun çözümü için uluslararası kuruluşlar tarafından geliştirilen standartlar (ISO 21597, ITU-T Y.3090 ve ISO 23247) önemli destek sağlamaktadır. Bu standartlar, dijital ikizlerin oluşturulması ve üretim sistemlerine entegrasyonunu kolaylaştırmak amacıyla geliştirilmiştir (Shao, 2021; Wallner vd., 2023).

ISO 23247 standardı, dijital ikizlerin üretim süreçlerine etkin biçimde entegre edilmesini destekleyen kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Bu standart sayesinde, fiziksel ve dijital sistemler arasındaki veri entegrasyonu ve süreç optimizasyonu mümkün hale gelmektedir. Standart, dijital ikizlerin üretim süreçlerini gerçek zamanlı izleme, analiz etme ve optimize etme kapasitesini artırmakta, bu da işletmelere stratejik avantajlar sağlamaktadır.

Üretim ortamlarında, dijital ikiz çerçeveleri genellikle, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi, takım tezgâhi siber ikizleri ve robotik montaj uygulamaları, güvenlik, inşaat, ulaşım ve sağlık gibi birçok sektörde, ürünlerin bakımını kolaylaştırma, maliyetleri düşürme ve güvenlik standartlarını artırma gibi alanlarda kullanılmaktadır. Yeni modeller, Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazları, sensör verileri, yapay zekâ ve blok zinciri gibi teknolojilerle desteklenmektedir (Farhadi vd., 2022; Yasser vd., 2023).

Bu çalışmaya benzer bir araştırma, Bitencourt vd. (2025) tarafından yapılmıştır. Bitencourt vd. (2025), dijital ikizin üretim uygulamalarında, doğrulama ve geçerliliğinin nasıl kullanıldığı ile ilgili sistematik bir literatür taraması yapmışlardır. Çalışmalarında,

Literatürdeki mevcut doğrulama ve geçerli kılma prosedürlerini ve Dİ'leri doğrulama ve geçerli kılma ile ilgili zorluklarını tartışmışlardır. Bu çalışmanın, Bitencourt vd. (2025)'nin araştırmalarından farklılıkları ve çalışmanın odak noktaları da aşağıda özetlenmiştir.

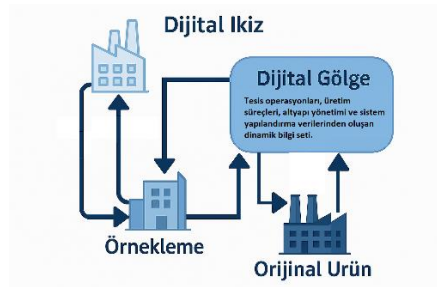
Bu çalışma, ISO 23247 standardının, dijital ikizlerin üretim sistemlerine entegrasyonundaki rolünü detaylı bir şekilde ele almayı ve bu entegrasyonun, Endüstri 4.0 ve 5.0 hedeflerine ulaşmadaki katkılarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda son yıllarda yapılan literatür çalışmalarının sistematik analizi yapılarak mevcut bilgiler sentezlenmiştir. Ayrıca, dijital ikiz teknolojisinin işletmelere sağladığı stratejik avantajlar üzerinde durularak bu konuda farkındalık oluşturulması hedeflenmiştir.

Araştırmanın ikinci bölümünde Dijital İkiz kavramı, ISO 23247 standardı ve kullanım alanları detaylandırılmıştır. Üçüncü bölümde, mevcut literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Son bölümde ise bulgular değerlendirilmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. DİJİTAL İKİZ KAVRAMI, ISO 23247 STANDARDI, DİJİTAL İKİZİN KULLANIM ALANLARI VE DİJİTAL İKİZLER İLE AYRIK OLAY SİMÜLASYONU YAKLAŞIMLARI

2.1. Dijital İkiz

Dijital ikizde, ürünlerinin, fiziksel ortamdan dijital ortama geçiş süreci üç aşamada gerçekleşmektedir. İlk olarak, orijinal ve fiziksel ürünün tüm özelliklerini içeren bir dijital master verisi oluşturulmaktadır. Daha sonra, bu veri temel alınarak ürüne ait operasyonel durum, süreç, tesis ve altyapı bilgileri gibi tüm detayları kapsayan bir dijital gölge meydana getirilmektedir. Son aşamada ise, bu iki temel katmanın entegrasyonu sağlanarak dijital ikiz oluşturulmaktadır (Kumaş ve Erol, 2021). Dijital ikizin kavramsal modeli Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Dijital İkiz Kavramsal Modeli

Dijital ikizler, bir ürünün tasarımından kullanımına kadar tüm yaşam döngüsü boyunca işlevsel ihtiyaçların belirlenmesiyle de şekillenmektedir. Yaşam döngüsü boyunca çevresel faktörler, paydaşlar, simülasyon araçları ve düzenleyici gereklilikler dikkate alınarak dijital ikizlerin yapılandırılması gereklidir. Bu yaklaşım, veri kalitesini optimize ederek varlıkların daha verimli kullanılmasını ve yaşam sürelerinin uzatılmasını sağlar. Dijital ikizler, ürünlerin işlevsel özelliklerini ve davranışlarını daha iyi anlamak için gerekli olan tüm bilgileri içermelidir. Dijital ikizlerin değeri, giriş verilerinin kalitesine bağlıdır. Veri kalitesinin yönetimi, ikizlerin güvenilirliği ve performansı için kritik öneme sahiptir. Veriler farklı kaynaklardan gelir ve yenilenme süreçleri değişiklik gösterebilir. Dijital ikiz arayüzlerinin veri güncellemelerini kolaylaştıracak şekilde tasarlanması ve güvenliğinin sağlanması gerekmektedir. Soyutlama seviyeleri, dijital ikizlerin farklı perspektiflerde işlev görmesini sağlar. Ancak, ikizlerin bileşimi ve birlikte çalışabilirliği hâlâ araştırma gerektiren bir alandır. Farklı yeteneklere sahip ikizlerin bir araya getirilmesi, sistemlerin performansını artırabilir. Standart ve uyumlu dijital ikiz platformlarının geliştirilmesi gereklidir. Dijital ikizlerin ölçeklenebilirliği, karmaşık sistemlerde önemli bir zorluk oluşturmaktadır. Örneğin, büyük enerji şebekelerinde binlerce ikizin eşzamanlı yönetimi, büyük veri analitiği ve otonom koordinasyon mekanizmalarını gerektirir. Ayrıca, gelecekteki potansiyel varlık ve işlevleri tahmin edebilme kabiliyeti, dijital ikizlerin stratejik önemini artırmaktadır (Serugendo vd., 2022; Fadaie vd., 2022; Verdecchia vd., 2023).

Dijital ikizlerin geliştirilmesinde ontolojiler önemli bir rol oynamaktadır. Ontolojiler, farklı sistemler ve uygulamalar arasında veri alışverişi ve anlamsal birlikte çalışabilirlik sağlamak için paylaşılan bir anlayış sunar. Bu kavram, dijital ikizlerin yaşam döngüsü boyunca verilerin anlamlandırılmasını ve paylaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Akıllı şebekeler ve enerji sistemlerinde ontolojiler, yazılım ajanlarının muhakeme yeteneklerini geliştirmek ve birlikte çalışabilirliği artırmak için kullanılmaktadır. Ancak, standartlaştırılmış ontoloji modellerinin oluşturulması konusunda daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, ontolojilerin organize bir yaklaşımla geliştirilmesi, dijital ikizlerin potansiyelini tam anlamıyla gerçekleştirebilmesi için kritik bir adımdır (Serugendo vd., 2022).

Dijital İkiz dört temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar (Noga vd.,2022):

- Gerçek alan,
- Sanal alan,
- Gerçek alan ile sanal alan arasındaki veri bağlantısı,
- Sanal alandan gerçek alana ve diğer sanal alt alanlara bilgi.

Dijital ikiz konsepti, genellikle sanal devreye alma ile ilişkilendirilir. Sanal devreye alma, cihazların sanal prototiplerinin kullanılarak programın işlevselliği ve mekanik yapıların doğrulanmasını ifade eder. Sanal devreye alma genellikle iki ana yaklaşımı temel alır. Bunlar (Noga vd.,2022):

- *Yazılım Döngüsü:* Bu yöntemde, kontrol donanımı da dahil olmak üzere tüm süreçler simüle edilir. Tasarım ve test aşamalarında, donanıma ihtiyaç duymadan yazılımın hızla programlanmasını sağlar ve tamamen çevrimdışı bir analiz sunar
- *Donanım Döngüsü:* Bu yöntemde, gerçek kontrol donanımı ile sanal cihazların gerçek zamanlı simülasyonu birleştirilir. Bu sayede, karmaşık otomasyon görevleri ve gerçek devreye alma sırasında kullanılacak kontrol sistemleri test edilebilir

Dijital ikizlerin başarısı, verilerin kalitesi ve güvenilirliği ile doğrudan ilişkilidir. Verileri sağlayan aktörler, sistemlerin doğru sonuçlara ulaşması için güvenilir bilgi sunmalıdır. Ayrıca, dijital ikizler, siber güvenliğin temel bir parçası olarak veri bütünlüğünü sağlamalıdır. Gelişmiş analitik ve yapay zekâ teknolojileri, dijital ikizlerin

karar verme yeteneklerini artırmakta ve karmaşık durumlarda operatörlere rehberlik etmektedir (Serugendo vd., 2022). Dijital İkizin, Endüstri 4.0 çözümlerini uygulamak için kullanılan bir referans mimarisi de RAMI (Referans Mimari Modeli) 4.0'dır. RAMI 4.0, Alman Elektrik ve Elektronik Üreticileri Birliği tarafından geliştirilmiş ve Endüstri 4.0'ın bütünsel bir çerçevede ele alınmasını sağlar. RAMI 4.0, işletmelerin dijitalleşme süreçlerini düzenlemek ve geleceğin ürün ve iş modellerini yapılandırmak için üç boyutlu bir harita sunar. RAMI 4.0 modeli, geleneksel OSI katman yapısını esas alır ve tasarım, geliştirme, dağıtım gibi endüstriyel süreçlerin dijitalleşmesini destekler. Ayrıca, hizmet odaklı mimariyi benimseyerek farklı uygulama senaryolarını yapılandırır. Bu çerçevede Dijital İkiz Referans Mimari Modeli, karmaşık dijital dönüşüm süreçlerini kolaylaştırmak için beş ana katman ve üç eksenli bir yapı önerir. Bunlar (Aheleroff vd., 2021; Melo vd., 2024):

1. *Fiziksel Katman*: Akıllı sensörler ve Nesnelerin İnterneti teknolojisi ile fiziksel verilerin olduğu aşamadır
2. *İletişim Katmanı*: Fiziksel dünya ile dijital dünyayı birbirine bağlayan veri iletişim sürecini ifade eder.
3. *Dijital Katman*: CAD, CAM gibi teknolojilerle fiziksel nesnelerin dijital kopyasının oluşturulduğu alandır.
4. *Siber Katman*: Büyük Veri, Bulut bilişim ve makine öğrenmesi gibi ileri teknolojileri kullanarak özerk kararlar alınmasını sağlar.
5. *Uygulama Katmanı*: Akıllı sistemlerin çıktılarının kullanıcılar tarafından kullanılabilir hale getirildiği üst düzeydir.

RAMI 4.0 Mimarisinin Bileşenleri (Melo vd., 2024):

1. *Katmanlar Boyutu*: Bu boyut, sanayi varlıklarının dijitalleşmesine dair BT perspektiflerini temsil eder. Her katman, farklı işlevleri ve rollerin tanımlandığı bir yapı sunar.
2. *Hiyerarşi Seviyeleri*: Donanım ve yazılım varlıklarının fabrikalarda veya tesislerdeki rolleri, işlevleri ve sorumlulukları bu düzeyde tanımlanır.
3. *Yaşam Döngüsü Değer Akışı*: IEC 62890 standardına dayanan bu boyut, tesislerin ve ürünlerin yaşam döngüsünü gösterir.

Dijital İkiz Entegrasyonu, Dijital Model, Dijital Gölge ve Dijital İkiz olarak üç seviyeye ayrılır. Bunlar (Aheleroff vd., 2021):

- *Dijital Model*: Fiziksel bir sistemin statik bir kopyasıdır ve simülasyonlar için kullanılır.
- *Dijital Gölge*: Fiziksel sistem ile dijital model arasındaki tek yönlü veri iletişimini ifade eder.
- *Dijital İkiz*: Fiziksel ve dijital sistemler arasındaki çift yönlü, gerçek zamanlı veri alışverişini mümkün kılar.

Dijital ikizlerin niteliklerini değerlendirmek için literatürde bir çerçeve sunulmaktadır. Çerçeve, beş ana değerlendirme kriteri etrafında şekillenir. Bunlar; sadakat (fidelity), zekâ (smartness), zamanında güncelleme (timeliness), entegrasyon (integration) ve standart uyumu (standard compliance) dur. Her kriter, ayrıntılı derecelendirme seviyeleriyle geniş bir kapsama sahiptir. Çerçeve kriterleri aşağıda açıklanmıştır (Liu vd., 2023).

1. *Sadakat*: Dijital ikizin, fiziksel sistemi ne kadar doğru bir şekilde taklit ettiğini ölçer. Parametre sayısı ve çıktı hassasiyetine göre dört seviyeli bir derecelendirme sistemi önerilir. Yüksek sadakat, bakım süreçlerinde kritik olup, ancak sensör, hesaplama kapasitesi ve uzmanlık gibi kısıtlamalar olabilir.
2. *Zekâ*: Dijital ikizin, işlevsellik düzeyini ifade eder ve dört seviyeye ayrılır: betimleyici, teşhis edici, öngörücü ve karar verici. Zekâ seviyeleri arttıkça, dijital ikizler daha karmaşık sistemlerde daha iyi sonuçlar sağlar, yapay zekâ da bu sürece katkıda bulunur.
3. *Zamanında Güncelleme*: Dijital ikizin fiziksel sistemdeki değişiklikleri ne kadar hızlı ve doğru yansıttığını değerlendirir. Bu, özellikle gerçek zamanlı veri ihtiyaçlarında önemlidir.
4. *Entegrasyon*: Dijital ikizin hem kendi içindeki hem de diğer sistemlerle olan bağlantısını ölçer. Otomatik veri akışıyla tam bütünleşmiş dijital ikizler, daha verimli çalışabilir ancak güvenlik açıklarını artırabilir.
5. *Standart Uyumu*: Dijital ikizin belirlenen standartlara, yönergelere ve en iyi uygulamalara uyumunu değerlendirir. Standartlara uyum, dijital ikizlerin güvenilirliğini ve ölçeklenebilirliğini sağlar.

Dijital ikizlerin üretimde sağladığı faydalar oldukça geniştir. Bu teknolojiler, üretim süreçlerinin esnekliğini artırarak, değişen koşullara hızlı bir şekilde yanıt verilmesini sağlar. Örneğin, atölyedeki beklenmedik bir durum karşısında üretim sırasını veya planını dinamik olarak değiştirebilme yeteneği, üretim süreçlerinin aksamasını önler. Ayrıca, ekipman kapasitesi, güvenilirliği ve doğruluğu hakkında daha detaylı ve zamanında bilgi sağlayarak üretim programlarının daha hassas bir şekilde yapılmasına olanak tanır. Kestirimci bakım uygulamaları sayesinde, ekipmanların performansı sürekli olarak izlenir ve bakım faaliyetleri üretimi aksatmadan, uygun zamanlarda

gerçekleştirilir. Dijital ikizler ayrıca, sanal devreye alma yoluyla, kontrol stratejilerinin ve tasarımlarının fiziksel sistemler kullanılmadan test edilmesine olanak tanır (Shao, 2021).

Dİ'lerin uygulanması ile süreçlerin otomasyonu ve denetimi iyileştirilmektedir. Dİ, gerçek zamanlı simülasyon ve etkileşim yetenekleri sayesinde, süreçlerdeki potansiyel hataların daha hızlı tespit edilmesine ve bu hatalara daha etkin yanıt verilmesine olanak tanır. Bu da üretim verimliliğinde artışa ve arıza sürelerinde azalmaya neden olur. Ayrıca, Dİ'nin Üretim Yürütme Sistemi ile entegrasyonu, üretim süreçlerinde daha hassas bir kontrol ve izleme imkânı sağlar. Dİ ile Artırılmış Gerçeklik (AG) ve Sanal Gerçeklik (SG) teknolojileri, üretim hattında daha sürükleyici ve etkileşimli bir deneyim sunar. Operatörler, bu teknolojiler sayesinde gerçek ortamlarla daha iyi etkileşime girer ve karar verme süreçlerinde daha doğru ve hızlı bir şekilde hareket edebilir. AG ve SG, ayrıca operatör eğitimi ve teknik bilgi aktarımı için de kullanılabilir, bu da teknik öğrenmeyi destekler (Caiza vd., 2024).

Dijital ikizler, veri toplama, işleme, iletişim, modelleme, görselleştirme ve karar yorumlama gibi karmaşık bileşenler içerir; her bir bileşen, belirsizlik kaynakları oluşturabilir. Aşağıda, bazı potansiyel belirsizlikler ve hatalar sunulmuştur (Shao vd., 2023):

1. *Ölçüm belirsizlikleri*: Sensörler, veri toplamada kritik rol oynar; ancak arızalar nedeniyle belirtilen belirsizliklerden daha fazla hata üretebilir. Örneğin, sıcaklık sensörleri arızalanabilir ve bu durum eksik veya hatalı verilerle sonuçlanabilir
2. *Veri hataları*: Veri toplama esnasında, sensör arızaları veya insan hataları gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Ayrıca, veri işleme, yönetimi, depolama ve iletişimi sırasında da hatalar oluşabilir. Veri gecikmesi, dijital ikizin gerçek zamanlı özelliklerini olumsuz etkileyebilir.
3. *Modelleme hataları*: Dijital ikizler, fiziksel sistemlerin basitleştirilmiş temsilleridir ve bu da hatalara yol açabilir. Kodlama hataları, yanlış modellemelere ve hesaplama hatalarına neden olabilir. Gerçek zamanlı verilerin yetersizliği, fiziksel sistemin mevcut durumunu tam olarak yansıtamayabilir.
4. *Sonuç yorumlama hataları*: Kullanıcı arayüzü aracılığıyla sunulan veriler genellikle gecikmelere, karmaşıklığa ve yanlış anlamalara yol açar. Belirsiz veri temsilleri ve net olmayan tahminler, hatalı kararlar alınmasına sebep olabilir.

Ürünlerin yanı sıra dijital ikizler de zamanla değişir. Bu nedenle, dijital ikizlerin yaşam döngüsü boyunca takip edilmesi faydalıdır. Üretim hücreleri için, makinelerin birbirleriyle olan ilişkileri, arayüzler ve iletişim gibi unsurların izlenmesi önemlidir. Yaşam döngüsü meta katmanı, dijital ikizin yapılandırmasını basitleştirir ve ölçümler ile yapılandırmalar arasında bağlantı kurulmasını sağlar (Wallner vd., 2023).

Dijital ikizleri, daha sık yeniden yapılandırma ve yaşam döngüsü boyunca izlemek gerekir. Dijital ikiz, özellikleri değişim sıklığına göre aşağıdaki gibi kategorize edilmiştir (Wallner vd., 2023):

- *Düşük frekanslı değişiklikler*: Yeni ürünlerle veya temel uyarlamalarla meydana gelen değişiklikler.
- *Orta frekanslı değişiklikler*: Araçlar, aparatları gibi üretim gereksinimlerinde meydana gelen değişiklikler.
- *Yüksek frekanslı değişiklikler*: Üretim süreci sırasında gerçek zamanlı verilerin izlenmesi gereken değişiklikler.

Dijital ikizlerin uygulanması ve dağıtımı için araçların değerlendirilmesine yardımcı olacak kapsamlı bir gereksinim listesine ihtiyaç vardır. Bu liste aşağıda sunulmuştur (Fadaie vd., 2022):

- *Sürekli entegrasyon ve dağıtım*: Dijital ikize gözlemlenebilir unsurlardan gelen değişikliklerin kolayca entegre edilmesi ve olası tutarsızlıkların önlenmesi
- *Alan uzmanlarının katılımı*: İş analistleri ve dijital ikizi işleten BT mimarları tarafından kolayca kullanılabilir olması, teknik detaylar hakkında ileri düzeyde bilgi gerektirmemesi.
- *Değiştirilebilirlik*: Katmanlar arası güvenlik mekanizmaları, grafik kullanıcı arayüzü veya kurumsal veri depoları gibi yeni bileşenlerin dahil edilmesi.
- *Platform birlikte çalışabilirliği*: Dijital ikiz platformunun, makine öğrenimi, simülasyon veya görselleştirme gibi katma değerli hizmetlerle genişletilmesi.
- *Sağlama*: Dijital ikizin bulut/kenar bilişim ortamında dağıtılarak dış denetime açık hale getirilmesi.
- *Tekrar kullanılabilirlik*: Ontoloji yorumlayıcıları veya makine öğrenimi algoritmaları gibi harici yazılım bileşenlerinin dijital ikize kolayca dahil edilmesi.
- *Sistem birlikte çalışabilirliği*: Dijital ikiz ile fiziksel cihazlar arasındaki etkileşim. Bu bağlamda, gözlemlenebilir unsurlar, bir IDS tabanlı lojistik ekosisteminden gelen Lojistik Operasyonel Verileri içerecektir. Bu nedenle, araç; ERP sistemleri ve IoT tarafından aktarılmış veri akışları gibi harici sistemler ve uygulamalardan veri entegrasyonunu desteklemelidir.

Dijital ikiz ile ilgili kullanılan standartlar aşağıda sunulmuştur (Shao, 2021):

1. *IEC TS 62832 – Dijital Fabrika Çerçevesi*: Bu standart, üretim sistemlerinin yaşam döngüsü boyunca dijital temsili oluşturmayı ve sürdürmeyi sağlayan bir çerçeve sunar. Üretim sistemleriyle ilgili süreçler ve ortaklar arasında tutarlı bilgi alışverişi sağlanabilir, böylece bilgi, yeniden kullanılabilir ve anlaşılabilir hale gelir.
2. *IEEE P2806 – Fiziksel Nesneler için Dijital Temsil Sistem Mimarisi*: Fabrika ortamlarındaki dijital temsilin bileşenleri, veri kaynakları ve prosedürünü tanımlar. Dijital fabrikaların oluşturulmasını destekler.
3. *IPC 2551 – Dijital İkizler için Uluslararası Standart*: IPC'nin Geleceğin Fabrikası standartları çerçevesinde, dijital ikizlerin mimarisi, türleri, karmaşıklıkları ve dijital iş parçacıkları gibi bileşenleri ele alır.
4. *DIN SPEC – Varlık Yönetimi Kabuğu (VYK)*: VYK, endüstriyel varlıklar ve üretim sistemleri arasında standartlaştırılmış veri alışverişini destekler. Endüstriyel dijital ikizlerin uygulanmasını sağlar.
5. *ISO 23247 – Üretim için Dijital İkiz Çerçevesi*: Üretim sistemlerinde dijital ikizlerin kullanımına ilişkin genel kılavuzlar sunar. Modellerin birleştirilebilirliği ve veri toplama, entegrasyon gibi unsurlar üzerinde durur.

ISO 23247 – Üretim için Dijital İkiz Çerçevesi bölüm 2.2’de detaylı olarak açıklanmıştır.

2.2. ISO 23247 Standardı

Bu standart, 2020 yılında ISO TC 184/SC 4 komitesi tarafından, üretim uygulamalarında dijital ikizlerin geliştirilmesini desteklemek amacıyla yayımlanmıştır. Standart, dijital ikizlerin oluşturulması için kapsamlı bir mimari çerçeve sunmakta olup, farklı üretim türlerine göre uyarlanabilir bir yapı sağlar. Özellikle üretim ortamlarında gözlemlenebilir unsurların modellenmesi için mevcut standartlar ve teknolojilere dayanarak esnek bir yapı önerir. Bu bağlamda, veri formatları ve iletişim protokolleri konusunda kısıtlayıcı olmamakta, bunun yerine açık bir çerçeve sunarak farklı teknolojilerin ve veri etki alanlarının kullanılmasına imkân tanımaktadır (Caiza vd., 2024). Bu standart, üreticilerin spesifik kullanım senaryolarına uygun dijital ikiz uygulamaları için alt sistem ve bileşenleri seçip kullanabilecekleri genel bir geliştirme çerçevesi sunar. Üreticilere, geçerli bileşenleri, ilişkilerini ve etkileşim özelliklerini sistematik bir şekilde tanımlama konusunda yardımcı olurken, uygun standartların birlikte çalışabilirliğini sağlamayı hedefler (Shao vd., 2023).

ISO 23247 serisi dört bölümden oluşur. Bunlar (Noga vd.,2022; Shao vd., 2023; Caiza vd., 2024):

1. *ISO 23247-1*: Üretim süreçlerinde dijital ikizlerin geliştirilmesi için ilkeler, kavramlar, sınırlamalar ve genel gereklilikler.
2. *ISO 23247-2*: Etki alanlarına ve varlıklara dayalı referans işlevsel görünümlemler ile model mimarisi.
3. *ISO 23247-3*: Gözlemlenebilir üretim elemanları için temel bilgi niteliklerinin listesi.
4. *ISO 23247-4*: Referans mimari içindeki varlıklar arasında bilgi alışverişi ve iletişim protokolleri için teknik gereklilikler.

İlk bölüm, üretimde Dİ geliştirme ile ilgili ilkeler ve gereksinimler hakkında rehberlik eder ve çerçevenin sınırlarını belirler. Bu sınırlar, ürün, süreç, personel, ekipman ve çevre gibi gözlemlenebilir üretim unsurlarını ve Dİ çerçevesini içerir, bu iki bileşen cihaz iletişim alanı ile senkronize edilir.

İkinci bölüm, referans mimariyi sunar ve fonksiyonel varlıklar ile ilişkili bir model sunar. Bu çerçevede, kullanıcı, Dİ, cihaz iletişimi ve gözlemlenebilir üretim unsurları gibi katmanlar yer alır ve her katmandaki görevler, gerekli işlevleri sağlamak için alt sistemlere bölünmüş varlıklar tarafından gerçekleştirilir. Cihaz iletişim alanı, gözlemlenebilir üretim unsurları ile Dİ alanını veri toplama ve cihaz kontrolü aracılığıyla senkronize eder. Veri toplama, gerekli verilerin tanımlanması, toplanması ve ön işlenmesi ile ilgilidir. Cihaz kontrolü ise personel, ekipman ve çevrelerde yapılabilecek kontrolleri, komutların cihazlara gönderilmesini içerir. Dİ alanı, personel, ekipman ve çevre gibi dijital temsillerini, veri modelini ve fiziksel ile sanal modellerin senkronizasyonunu sağlamak için gereken tüm bilgileri barındırır. Ayrıca, bu alanda simülasyon, veri analizi gibi uygulamalar aracılığıyla izleme, tahmin, optimizasyon ve teşhis gibi işlevler sunulur. Kaynak erişimi ve değişimi, Dİ işlevlerinin diğer varlıklarla veya diğer Dİ'lerle etkileşiminde ele alınır. Kullanıcı alanı ise insan, cihaz, denetim sistemi ya da diğer Dİ'lerin Dİ varlığı ile etkileşime geçmesini sağlar.

Üçüncü bölüm, üretim unsurlarının dijital temsili ile ilgilidir ve personel, ekipman ve çevreler için statik ya da dinamik bilgi niteliklerini içerir.

Son bölüm ise referans mimarisindeki varlıkların bilgi alışverişi için gereken teknik özellikleri belirler. Bu amaçla dört ağ tanımlanmıştır: Kullanıcı ağı, Dİ varlıklarına erişim sağlayarak hizmetleri ve uygulamaları etkinleştirir. Hizmet ağı, Dİ varlığına ait alt varlıkları birbirine bağlar. Erişim ağı, cihaz iletişimi ile Dİ ve kullanıcı varlıkları

arasında veri iletimini sağlar. Yakınlık ağı ise cihaz iletişim varlığı ile personel, ekipman ve çevreler arasında veri alışverişini gerçekleştirir (Melo vd., 2024).

ISO 23247, dijital ikiz uygulamalarını standartlaştırmak için bir çerçeve sunar ve üretimdeki dijital ikizler için aşağıdaki temel unsurları içerir (Farhadi vd., 2022):

- *Gözlemlenebilir Üretim Unsurları (GÜÜ)*: Fiziksel varlıklar, ekipman, malzemeler, süreçler ve çevresel unsurlardır.
- *Varlık ve İşlev Modelleri*: Dijital ikizler, GÜÜ'ler ile veri alışverişi yapar ve süreç boyunca dinamik değişimleri takip eder. Statik bilgiler (örneğin, delik çapı) ve dinamik bilgiler (örneğin, sıcaklık) bir arada değerlendirilir.
- *İletişim ve Simülasyon*: Verilerin senkronizasyonu, "MTConnect", "OPC-UA" veya "MQTT" gibi protokollerle gerçekleştirilir. Ayrıca, simülasyon ve kestirimci bakım gibi analizlerle süreç optimizasyonu sağlanır.

Dijital İkizler, fiziksel varlıkların dijital kopyalarını temsil ederek fiziksel ve dijital dünyalar arasında iki yönlü, dinamik bir etkileşim sağlar. Bu teknoloji, gerçek zamanlı veri akışı ve simülasyon yetenekleriyle fiziksel varlıkların davranışlarını ve performanslarını sanal ortamda gözlemleyip optimize etme olanağı sunar (Aheleroff vd., 2021):

ISO 23247'ye göre tasarlanan dijital ikiz, katmanlar boyutu aracılığıyla, RAMI 4.0 ile uyumlu hale getirildiğinde, aşağıdan yukarıya analiz edildiğine aşağıdaki katmanlardan oluşur (Melo vd., 2024):

- *Varlık Katmanı*: Dijitalleştirilebilecek varlıkları içerir. Ölçüm denetim istasyonları gibi ISO 23247 kapsamındaki Gözlemlenebilir Üretim Elemanları ile ilişkilidir.
- *Entegrasyon Katmanı*: Üst katmanların, ilk katmandan toplanan verilere erişmesini sağlar.
- *İletişim Katmanı*: Veri alışverişinin düzgün bir şekilde gerçekleşmesini sağlamak için standart iletişim protokollerini kullanır. Bu katman, fiziksel süreçlerden veri toplanmasını ve uygulanan Dİ işlevselliklerinden kaynaklanan eylemlerin geri döndürülmesini sağlar.
- *Bilgi ve İşlevsellik Katmanları*: Sırasıyla, hizmetler ve bileşenler arasında iletişim için uygun bilgi yapılandırmasını ve varlığın sağlayabileceği işlevleri belirtir. Bu, veri analitik araçları ve olasılık simülasyonlarını içerir.
- *İş Katmanı*: Dijital varlığın sunduğu hizmetleri, iş perspektifinden algılar. Bu katman, Dİ'nin sunduğu işlevselliklerden elde edilen verilerin sunulduğu veya simülasyonlar için yeni verilerin girişi yapılabileceği kullanıcı alanıyla ilişkilidir.

Varlık tabanlı referans modeli, dört ana katmandan (varlıklar) oluşan segmentli bir katmanlı desen kullanır: Cihaz İletişimi, Dijital İkiz, Kullanıcı ve Sistemler Arası varlıklar. Her varlık, rastgele sayıda alt varlığa sahiptir. Cihaz İletişimi varlığı, Gözlemlenebilir Üretim Öğelerinden (GÜÖ) veri toplamak ve bu öğeleri kontrol etmekten sorumludur. Standart, GÜÖ'leri, fiziksel varlığı veya üretimde bir işlevi olan öğeler (örneğin, ürünler, süreçler, ekipmanlar) olarak tanımlar. Dijital İkiz varlığı ise, Cihaz İletişimi varlığından toplanan verileri modellemekten ve gerçekleştirme, yönetim, senkronizasyon ve simülasyon gibi işlevler sağlamaktan sorumludur.

Varlık Yönetimi Kabuğunun Yapılandırılmasına Yönelik Yaklaşım, dijital ikiz ve Varlık Yönetim Kabuğunun yapılandırma sürecini sekiz adıma ayırmaktadır. Bunlar (Risling vd., 2023).

1. *Vizyon ve Bağlam Tanımı*: İlk olarak, projeye yönelik vizyon ve bağlam belirlenir. Bu kavramsal fikir detaylandırılır ve çözüm geliştirme sürecinin temeli olarak kullanılır.
2. *Paydaş Gereksinimleri*: Paydaşların gereksinimleri sistematik olarak analiz edilir, kategorize edilir ve amaca yönelik bir sanal temsil kavramı oluşturulur.
3. *Kullanım Durumu Tanımı*: Paydaş gereksinimlerine göre kullanım senaryoları belirlenir ve detaylandırılır. Bu, paydaşların beklentilerini ve kullanım nesneleriyle etkileşimlerini içerir.
4. *Varlık Seçimi*: Seçilen kullanım senaryolarına göre üretim varlıkları belirlenir. Bu varlıklar, IEC 63278 ve ISO 23247 standartlarına göre yapılandırılır.
5. *Normlar ve Kılavuzların Seçimi*: Uygun standartlar ve spesifikasyonlar dikkatle seçilir. Bu adım, alana özgü hususlar ve gereksinimler için kritik bir fırsat sunar.
6. *Alt Modellerle Karşılaştırmalı Analiz*: Standartlaştırılmış alt modeller, belirlenen kullanım durumlarıyla karşılaştırılır ve potansiyel boşluklar tespit edilir. Bu, eksik yapıların ortaya çıkarılması açısından önemlidir.
7. *VYK Yapısına Standart Eşleme*: Seçilen standartlar ve kılavuzlar AAS yapısına entegre edilerek alana özgü gereksinimlerin karşılandığı doğrulanır.

8. Temsil Konseptinin Doğrulanması: Son olarak, oluşturulan DT ve AAS yapılandırmalarının kullanım senaryoları ile uyumu doğrulanır. Eğer bir uyumsuzluk tespit edilirse, yapı yeniden değerlendirilir ve gerekirse revize edilir (Risling ve ark., 2023)

Varlık tabanlı referans modeli, dört ana katmandan (varlıklar) oluşan segmentli bir katmanlı desen kullanır: Cihaz İletişimi, Dijital İkiz, Kullanıcı ve Sistemler Arası varlıklar Her varlık, rastgele sayıda alt varlığa sahiptir. Cihaz İletişimi varlığı, Gözlemlenebilir Üretim Öğelerinden veri toplamak ve bu öğeleri kontrol etmekten sorumludur. Standart, GÜÖ'leri, fiziksel varlığı veya üretimde bir işlevi olan öğeler (örneğin, ürünler, süreçler, ekipmanlar) olarak tanımlar. Dijital İkiz varlığı ise, Cihaz İletişimi varlığından toplanan verileri modellemekten ve gerçekleştirme, yönetim, senkronizasyon ve simülasyon gibi işlevler sağlamaktan sorumludur. Kullanıcı varlığı, Dijital İkiz varlığının sağladığı hizmetleri kullanır ve çerçevenin uygulamasını barındırır. Sistemler Arası varlık, güvenlik ve veri çeviri güvenliği gibi ortak işlevler sağlamak için diğer tüm varlıkları kapsar. Standart, bir Dİ uygulamasının aşağıdaki faaliyetlerin gerçekleştirmesi önerilmektedir (Ferko vd.,2023):

1. *Veri Toplama*: GÜÖ'lerden toplanması gereken verileri belirler.
2. *Veri Ön İşleme*: Toplanan verilerin işlenmesini sağlar (örneğin, filtreleme, birleştirme).
3. *Kontrol Tanımlama*: Kontrol edilecek bir GÜÖ 'ü tanımlar.
4. *Kontrol*: Uygun komutları GÜÖ'e gönderir.
5. *Aktüatör*: GÜÖ'yü harekete geçiren bir mekanizmadır.
6. *Dijital Temsil*: Bir GÜÖ'nün bilgilerini modellemek için kullanılır.
7. *Sunum*: Bilgileri uygun bir formatta (örneğin, metin, grafikler) görüntüler.
8. *Bakım*: Dİ'lerin operasyonel kalmasını sağlar.
9. *Senkronizasyon*: Dİ'nin durumu ile GÜÖ'nün durumu arasında senkronizasyon sağlar.
10. *Simülasyon*: GÜÖ'nün davranışını tahmin eder.
11. *Analitik Hizmet*: GÜÖ'lerden ve Simülasyondan toplanan verileri yönetir ve analiz eder.
12. *Raporlama*: Üretim sonuçlarını raporlar.
13. *Uygulama Desteği*: Kestirimci ve reaktif bakım hizmetlerini sağlar.
14. *Birlikte çalışabilirlik desteği*: Dİ'ler ile diğer sistemler arasında entegrasyonu sağlar.
15. *Güvenlik desteği*: Kimlik doğrulama, yetkilendirme ve veri güvenliğini sağlar.
16. *Erişim Kontrolü*: Kullanıcı varlığına erişimi kontrol eder.
17. *Veri Çevirisi ve Veri Güvenliği*: Varlıklar arasında değiş tokuş edilen verilerin güvenliğini sağlar.
18. *Tak ve Çalıştır Desteği*: GÜÖ'nün Dİ 'ye dinamik olarak bağlanmasını sağlar.
19. *Eş Arayüzü ve Kullanıcı Arayüzü*: Diğer Dİ'lere ve kullanıcı varlığı ile dijital ikiz varlığı arasındaki arayüzleri sağlar.

2.3. Dijital İkizin Kullanım Alanları

Endüstri 4.0 ve 5.0'ın amacı, kullanıcı (müşteri) talebini, çevik bir şekilde (istenilen zaman ve yerde) gerçekleştirmek için mamul ve hizmet üretim süreçlerini, dijital ortamda, insan odaklı, minimum maliyetle, sıfır hata yaklaşımı ile israfların olmadığı bir üretim sistemi oluşturmaktır. Dİ, Endüstri 4.0 ve 5.0 üretim sistemlerinde, gerçek dünya ortamlarında, karar vermeyi desteklemek için kullanılan güvenilir teknolojiler içerir. Dİ bir Endüstri 4.0 ve 5.0 teknolojisi olup aynı zamanda, Endüstri 4.0 ve 5.0 teknolojilerinden olan nesnelerin interneti, makine öğrenme ve simülasyon tekniklerini de içermektedir (Kına, 2025).

Dijital ikizler farklı amaçlar doğrultusunda kullanılabilir. Çalışma hücresi bileşenleri ve yapılandırması ile dijital ikiz aşağıdaki hedefleri gerçekleştirmek için kullanılabilir (Kibira vd., 2023):

- *Üretim Sürecinin Optimize Edilmesi*: Gerçek zamanlı programlama ve kontrol, robot kollarına atanan görevlerin optimizasyonu için kullanılır
- *Gerçek Zamanlı İzleme ve Kalite Kontrol*: CMM, işlenen parçaların boyutlarını ölçer ve dijital ikiz bu verileri kullanarak kalite sorunlarını tespit eder.
- *Tahmin ve Sağlık Yönetimi*: Dijital ikiz, robot kollarının arıza durumlarını tahmin etmek için kullanılır, bu sayede bakım zamanlaması optimize edilir.
- *Hücreyel Yeniden Yapılandırmaların Test Edilmesi*: Üretim talepleri değiştikçe dijital ikiz, robot kollarının ve CNC tezgahının görevlerini yeniden yapılandırmayı değerlendirir ve esneklik sağlar.

Kibira vd., (2023) bir robot kolunun dijital ikizinin geliştirilme sürecini ele alınarak, ISO 23247 standardı çerçevesinde bir uygulama örneği sunmuştur. Robot kolunun, CNC tezgahına iş parçasını yükleme ve boşaltma gibi görevleri yerine getirirken, dijital ikizinin geliştirilmesine yönelik süreci detaylandırmıştır. Dijital ikiz geliştirme adımları aşağıda sunulmuştur.

Veri Toplama: Robot kolunun fiziksel sisteminden veri toplama işlemi, bir dizi donanım ve yazılım kombinasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Universal Robot'un Gerçek Zamanlı Veri Değişim Arayüzü, API'si, robotun her bir eklemine ilişkin açısal pozisyon, hız, ivme, tork, akım ve sıcaklık verilerini toplamak için kullanılmıştır.

1. **Fiziksel Sistemin Modellenmesi:** Fiziksel modelleme, robotun bileşenlerinin (robot tabanı, bağlantılar, eklemeler ve iş parçası gibi) 3 boyutlu geometrisini içermektedir. Bu bileşenler, fiziksel modelleme yazılımında 'bloklar' olarak tanımlanmış ve robotun dijital dünyada bir temsili oluşturulmuştur.
2. **Veri İşleme ve Dijital İkiz Güncellemeleri:** Toplanan veriler işlenerek dijital ikizi güncellemek üzere kullanılmaktadır. "MTConnect" standardı ile toplanan veriler, "MTConnect" ajanına aktarılmış ve "XML" formatında işlenmiştir. Veri toplama için Python UR-RTDE API'si kullanılarak bir adaptör geliştirilmiş ve robot koluna bağlanmıştır.
3. **Dijital İkizin Modellenmesi:** Robot kolunun dinamik davranışları "SimScape" ortamında modellenmiştir. CAD modelleri, robot kolu bileşenlerinin geometrisini tanımlamak için kullanılmış ve bu modeller dijital ikize entegre edilmiştir. Ek olarak, kinematik ve dinamik modellerin oluşturulması için "Denavit-Hartenberg (DH)" parametreleri ve atalet özellikleri de dijital modele dahil edilmiştir.
4. **Bileşen Dijital İkizlerinin Entegrasyonu:** Robot kolu, CNC tezgâhı ve CMM gibi iş hücresindeki diğer bileşenlerin dijital ikizleri bir araya getirilmiştir. Gerçek dünyadaki cihazlar arasındaki veri alışverişi, "MTConnect" ve Robot İşletim Sistemi (RİS) kullanılarak sağlanmıştır.
5. **Dijital İkizin Doğrulanması:** Dijital ikizin doğrulanması, gerçek sistemin doğru bir temsili olup olmadığını kontrol etmek açısından önemlidir. Fiziksel sistemden alınan veri ile dijital ikizin ürettiği sonuçlar karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır. Örneğin, robot kolunun eklem pozisyonu, hız ve ivme verileri dijital ikize aktarılmış ve elde edilen tork değerleri fiziksel sistemle uyumlu olup olmadığı incelenmiştir.

Dijital ikizin kullanımı ile ilgili diğer bazı çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- Gerçek zamanlı programlama ve kontrol, robot kollarına atanan görevlerin optimizasyonu ve üretim süreçlerinde etkinlik sağlamak için dijital ikiz kullanılır (Reed vd., 2021; Shao, 2021).
- Ekipmanların sürekli izlenmesiyle kestirimci bakım uygulaması, arıza ve duruş sürelerinin minimize edilmesinde Dİ kullanılır (Farhadi vd., 2022; Liu vd., 2023; Shao, 2021).
- Dijital ikizler, üretim sırasında kalite kontrolünün gerçek zamanlı olarak yapılmasını sağlar. Örneğin, CNC makinelerde gerçek zamanlı izleme ve performans artışı için kullanılır (Cabral vd., 2023).
- Üretim hücrelerinde dijital ikizler, üretim taleplerine göre hızlı ve dinamik olarak yeniden yapılandırmalar sağlar (Wallner vd., 2023).
- Dİ, fiziksel sistemlere ihtiyaç duymadan sanal devreye alma ve eğitim süreçlerinde etkin kullanım sunar. Bu süreç, gerçek sistemleri etkilemeden kontrollerin doğruluğunu sağlar (Shao, 2021).
- Enerji altyapılarında, veri paylaşımı ve birlikte çalışabilirlik sağlayan ontolojiler aracılığıyla dijital ikizler kullanılmaktadır (Serugendo vd., 2022).
- Metal eklemeli imalat ve robotik üretimde dijital ikizler, kusur tespiti ve kaynak optimizasyonu gibi amaçlar için etkin kullanılmaktadır (Cabral vd., 2024; Kim vd., 2022).
- Dijital ikizler, lojistik süreçlerinde kaynak planlama, dinamik kontrol ve adaptasyon sağlayarak verimlilik artışı elde edilmesini sağlar (Marinković vd., 2023; Poechgraber vd., 2023).
- Nöromüskuloskeletal sağlıkta kişiselleştirilmiş tedavi yöntemleri ve gerçek zamanlı biyomekanik izleme gibi alanlarda dijital ikiz kullanımı artmaktadır (Saxby vd., 2023; Hasan vd., 2025).

Dijital ikizlerin çok çeşitli alanlarda uygulanması, verimliliği artırmakta, maliyetleri düşürmekte ve süreçleri, sürdürülebilir hale getirmektedir. Bu nedenle, dijital ikiz teknolojisinin farklı sektörlerde giderek daha fazla kullanılması beklenmektedir.

2.4. Dijital İkizler ve Ayrık Olay Simülasyonu Yaklaşımları

Dİ'ler, fiziksel sistemlerle çift yönlü ve otomatik veri akışı sağlayarak, sistemin mevcut durumunu yansıtır ve performansı tahmin edip optimize eder. Ayrık Olay Simülasyonu (AOS) ise, endüstriyel sistemlerin analiz ve optimizasyonu için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. AOS modelleri, çeşitli olaylar arasındaki etkileşimleri ve sistem durumunu ayrık zamanlarda izleyerek gerçek sistemlerin işleyişini simüle eder. Simülasyonun bu geleneksel uygulamaları, statik bir model oluşturup bu model üzerinde analizler yapmak üzerine kuruludur ve genellikle tek seferlik bir analiz sonrasında model kullanımdan kaldırılır. Dİ yaklaşımı, geleneksel AOS modellerinden çok daha dinamik ve otonom bir yapı sunar. Dİ modelleri, gerçek sistemin mevcut durumunu

sürekli olarak yansıtan ve bu bilgiyi kullanarak optimize edilen çözümleri, gerçek zamana yakın bir şekilde fiziksel sisteme uygular. Bu farklılıklar aşağıdaki temel alanlarda ortaya çıkar (Reed vd., 2021):

1. *Veri Kullanımı*: Geleneksel AOS modellerinde gerçek sistemden belirli bir anda toplanan statik verilere dayanılırken, Dİ modelleri, sürekli veri akışını (sensörlerden veya veri tabanından gelen) kullanarak sistemin zaman içerisindeki evrimine uyum sağlar.
2. *Model Geliştirme*: Dİ için bir "model jeneratörü" geliştirilir. Bu jeneratör, fiziksel sistemin mevcut durumunu yansıtan bir modeli dinamik olarak oluşturur ve her seferinde bu modeli yeniler.
3. *Otonom Kontrol ve Optimizasyon*: Dİ modelleri, fiziksel sistemdeki değişikliklere uyum sağlamak için sürekli analiz döngülerinden geçer. Bu döngüler, sistemin mevcut durumunu senkronize etmek, simüle etmek ve optimize edilen çözümleri fiziksel sisteme uygulamak üzerine kuruludur.
4. *Gerçek Zamanlı Çalışma*: Dİ'nin analiz döngüleri, sistemin durumunu saniyeler içinde güncelleyerek gerçek zamana yakın karar verme mekanizmaları sunar.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Endüstri 4.0, üretimde esnekliği artırırken kalite ve verimliliği geliştirme potansiyeli sunmaktadır. Dördüncü Sanayi Devrimi, akıllı, siber-fiziksel sistemler ile donatılmış fabrikaların, otonomi, kendi kendine yapılandırma ve izleme gibi özelliklerle yönlendirilen bir üretim ekosistemi oluşturmasını sağlar. Bu sistemler, işletmelerin müşteri taleplerine hızlı bir şekilde yanıt vermesine olanak tanırken, uygun maliyetli kişiselleştirme sunma ihtiyacı da gündeme gelir. Ancak, kişiselleştirmenin maliyet etkinliği, birçok değişkenle bağlantılıdır. Kitleli Kişiselleştirme Üretimi bu bağlamda en üst düzey kişiselleştirme anlayışı olarak öne çıkmakta, ancak üretim sürecinde şeffaflık eksiklikleri yaşanmaktadır. Gelişen teknolojiler arasında Nesnelerin İnterneti (IoT), Yapay Zekâ, Artırılmış Gerçeklik (AR) ve Dijital İkiz gibi kavramlar, üretim sektörünün dinamik değişimlere uyum sağlamasına ve pazara sunma sürelerini azaltmasına yardımcı olmaktadır. Kitleli Özelleştirme Üretimi, önceden belirlenmiş ihtiyaçları karşılarken, müşteri memnuniyetini en üst düzeye çıkarmayı hedefleyerek dönüşüm sağlamaktadır. Dijital İkiz teknolojisi, dijital ve fiziksel dünyalar arasındaki boşluğu kapatarak bu kişiselleştirmenin gerçekleştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Aheleroff vd., 2020).

Dijital İkiz çerçevesi ve ISO 23247 standardı ile ilgili son yıllarda literatürde yapılan çalışmalar, Tablo 1 de sınıflandırılarak sunulmuştur.

Tablo 1. Dijital İkiz çerçevesi ve ISO 23247 standardı ile ilgili literatürde son yıllarda yapılan araştırmalar

YAZARLAR	TEMA/ODAK	KULLANILAN ARAÇLAR/ STANDARTLAR	SEKTÖR/ UYGULAMA ALANI	KATKILAR
Aheleroff vd. (2020)	Dİ'nin standartlaştırılması	ISO 23247, NIST, IEEE 1451	Genel endüstriyel üretim	Dİ referans modeli önerisi; maliyet ve zaman tasarrufu.
Shao (2021)	Üretim senaryoları	ISO 23247	Makine sağlığı, üretim planlama	Kestirimci bakım, dinamik çizelgeleme, sanal devreye alma.
Jacoby vd. (2021)	Veri paylaşımı ve egemenlik	Uluslararası veri alanları	Endüstri 4.0	Güvenli ve standartlaştırılmış Dİ mimarisi.
Reed vd. (2021)	Dİ, Ayrık olay simülasyonu	-	Üretim optimizasyonu	Gerçek zamanlı karar alma ve otonom kontrol avantajları.
Aheleroff vd. (2021)	Hizmet olarak Dİ	IoT, Büyük veri, Bulut bilişim	Sulak alan yönetimi	Çift yönlü veri akışı ve çevresel çözümler.
Yasin vd. (2021)	KOBİ'ler için Dİ çerçevesi	Node-Red, MySQL, Grafana, 3DExperience	KOBİ'ler	Düşük maliyetli gerçek zamanlı veri entegrasyonu ve 3D modelleme.
Serugendo vd. (2022)	Enerji sektöründe Dİ	IEC 61850, Ontolojiler	Enerji altyapısı	Trafo merkezlerinde veri paylaşımı ve birlikte çalışabilirlik.
Farhadi vd. (2022)	Robotik delme süreçleri	ISO 23247, Profinet/IO, PyQtGraph	Robotik üretim	Delik kalitesi optimizasyonu ve kestirimci bakım.

Kim vd. (2022)	Tel ve Ark Eklemeli İmalat (TAEİ)	OPC UA, CNN	Metal eklemeli imalat	Kusur tespiti ve süreç tekrarlanabilirliği.
Shao vd. (2023)	Dİ güvenilirliği	ISO 23247, ASME VV50	Üretim	Doğrulama, geçerlilik ve belirsizlik yönetimi.
Spaney vd. (2023)	Model tabanlı Dİ mimarisi	OPC UA, Siber-Fiziksel Sistemler	Frezeleme	Takım aşınması izleme ve geometrik hata telafisi.
Liu vd. (2023)	Bakım stratejileri için Dİ çerçevesi	Sadakat, zekâ, entegrasyon kriterleri	Genel endüstriyel bakım	Bakım türlerine göre Dİ seviyelerinin belirlenmesi ve standart uyum rehberliği.
Renard vd. (2023)	Üretim entegrasyonu	ISO 23247, modüler tasarım	Üretim Sistemleri	Standartlaştırılmış veri toplama ve senkronizasyon çerçevesi.
Marinković vd. (2023)	İç taşıma sistemleri	Sistem mühendisliği yaklaşımı	Lojistik & Dağıtım	Kaynak planlama ve dinamik kontrol için referans mimari.
Yasser vd. (2023)	İç taşıma sistemleri (tekrar)	Standart işlevler, uzman doğrulaması	Lojistik & Dağıtım	Sektörler arası uyum sağlayan geliştirilmiş çerçeve.
Poechgraber vd. (2023)	Lojistik sistemlerde Dİ	Veri toplama, simülasyon	Lojistik	Karmaşık sistemlerde adaptasyon ve verimlilik artışı.
Shaimergenova vd. (2023)	Katmanlı Üretim (KÜ)	Microsoft Azure, middleware	Katmanlı Üretim	Veri akışı optimizasyonu ve fiziksel-sanal entegrasyon.
Wallner vd. (2023)	Esnek üretim hücreleri	ISO 23247, yaşam döngüsü meta katmanı	Robotik Üretim	Değişikliklere uyum sağlayan Dİ tasarımı.
Risling vd. (2023)	Hidrojen elektrolizör üretimi	Varlık Yönetim Kabuğu (VYK)	Enerji Üretimi	Dağıtık üretim sistemleri için standartlaştırılmış Dİ.
Klar vd. (2023)	Birlikte çalışabilirlik	ISO 23247, Bilgi yönetim çerçevesi	Genel endüstriyel üretim	Ulusal Dİ ekosistemi için açık standartlar.
Ferko vd. (2023)	Referans mimariler	ISO 23247 (dört katmanlı mimari)	Üretim	Karmaşıklığı azaltan standartlaştırılmış Dİ yönetimi.
Cabral vd. (2023)	CNC makine Dİ'si	MQTT, MTConnect	CNC Üretim	Gerçek zamanlı izleme ve performans artışı.

Tablo 1. (devamı)

YAZARLAR	TEMA/ODAK	KULLANILAN ARAÇLAR/STANDARTLAR	SEKTÖR/UYGULAMA ALANI	KATKILAR
Saxby vd. (2023)	Sağlık sektöründe Dİ	ISO 23247 (uyarlanmış)	Nöromüsküler eletal Sağlık	Kişiselleştirilmiş tedavi ve biyomekanik izleme.
Kibira vd. (2023)	Robot çalışma hücresi	MTConnect, ISO 23247	KOBİ'ler	Uygun maliyetli akıllı üretim çözümleri.
Melo vd. (2024)	Otomotiv montaj hatları	ISO 23247, RAMI 4.0, lazer sensörler	Otomotiv Üretimi	Sıfır hata üretimi için gerçek zamanlı izleme ve boyutsal veri analizi.
Ferko vd. (2024)	Birlikte çalışabilirlik	ISO 23247, VYK, Model güdümlü mühendislik	Genel endüstriyel üretim	Veri dönüşümlerinin otomatikleştirilmesi ve çoklu dil entegrasyonu.
Caiza vd. (2024)	Üretim yürütme sistemleri	OPC UA, AR/VR, IoT, siber-fiziksel sistemler	Endüstri 4.0 Laboratuvarı	Çoklu teknoloji entegrasyonu ile performans artışı.
Caiza vd. (2024a)	Esnek üretim + AG entegrasyonu	ISO 23247, Meta 2 AR, Unity, MQTT, Senso Glove	Robotik Üretim	Jest kontrollü AG ile %95 doğruluk ve 17 sn hata düzeltme iyileşmesi.
Cabral vd. (2024)	Katmanlı Üretim (KÜ) robotiği	ISO 23247, ABB IRB 2600, MQTT	Metal eklemeli imalat	Gerçek zamanlı simülasyon ve kaynak süreç optimizasyonu.
Marino vd. (2024)	KOBİ'lerde Dİ adaptasyonu	IoT, AI, SWOT analizi	KOBİ'ler/Mühendislik	Operasyonel verimlilik, maliyet azaltma; veri

				bütünleştirme ve siber güvenlik zorlukları.
Kına vd. (2024)	Dijital araç yönetimi	Web tabanlı araç takip ve izleme sistemi	Üniversite yerleşkesi	Karbon ayak izini azaltma
Zheng vd. (2025)	KOBİ'lerde veri odaklı dönüşüm	Organizasyonel Bilgi İşleme Teorisi	KOBİ'ler	Operasyonel esneklik ve ekosistem inovasyonu.
Link vd. (2025)	Sac metal şekillendirme	CNN, PSO, Beckhoff kontrol sistemi	Otomotiv	Gerçek zamanlı kalite kontrol ve kaynak optimizasyonu.
Hasan vd. (2025)	Sağlıkta verimlilik ve kişiselleştirme	Açıklanabilir AI, SEM, in silico simülasyonlar	Sağlık Hizmetleri	Gerçek zamanlı hasta izleme, erken teşhis, kaynak optimizasyonu
Bitencourt vd. (2025)	Dİ için sistematik literatür araştırması	Doğrulama, Geçerli kılma, Endüstri 4.0	Üretim uygulamaları	Doğrulama ve Geçerlilik için Dİ kullanımının araştırılması

Tablo 1’de verilen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Aheleroffa vd. (2020), Endüstri 4.0’ın dijitalleşmeyle, endüstriyel süreçlerde devrim yarattığını ve iş dünyasında çok yönlü değişimlere yol açtığını belirtmişlerdir. Bu dönüşümün, kitlesel üretimle bireysel müşteri ihtiyaçlarını karşılayabilen, esnek ve düşük maliyetli çözümler sunma gerekliliğini ortaya çıkardığı ifade edilmiştir. Dijital İkiz teknolojisinin, fiziksel varlıkların sanal karşılıklarını oluşturarak üretim sürecinde maliyet ve zaman tasarrufu sağladığı, ayrıca işletmelere süreç takibi, analiz ve optimizasyon gibi imkanlar sunduğu vurgulanmıştır. Çalışmalarında, bu teknolojinin kullanımını ele alan yazarlar, ISO 23247 serisi ve NIST ile IEEE 1451 standartları çerçevesinde desteklenen bir Dijital İkiz referans modeli önermişlerdir.

Shao (2021), çalışmasında, dijital ikizlerin, üretim süreçlerine entegrasyonunu ve bu teknolojinin sunduğu faydaları kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Araştırmada, ISO 23247 standardını temel alarak, dijital ikiz uygulamalarını, üç ana senaryo üzerinden incelemiştir: makine sağlığı, izleme ve kestirimci bakım, üretim süreçlerinin dinamik olarak çizelgelenmesi ve yönlendirilmesi ile sanal devreye alma. Bu senaryoların, üretimde verimliliği artırmak, maliyetleri düşürmek ve hataları önlemek amacıyla dijital ikizlerin kullanılabilirliğini vurguladığını belirtmiştir. Ayrıca, çalışmada, dijital ikizler için uluslararası standartların geliştirilmesinin, bu teknolojinin daha yaygın ve etkili bir şekilde uygulanmasındaki önemine dikkat çekilmiştir.

Jacoby vd (2021), endüstriyel üretim bağlamında Dijital İkizlerin veri paylaşımı ve egemenliği ile nasıl etkinleştirileceğini açıklamışlardır. Endüstri 4.0, Uluslararası Veri Alanları araçlarının, Dİ'nin güvenli ve standartlaştırılmış bir şekilde uygulanmasını sağladığını belirtmişlerdir. Önerilen mimarinin, veri akışı ve kullanımını kontrol ederken, Dİ'nin yeniden kullanılabilirliği ve genişletilebilirliği gibi önemli özelliklerini desteklediği ifade edilmiştir.

Reed vd. (2021), Dijital İkizler ve Ayrık Olay Simülasyonu yaklaşımlarını karşılaştırarak, bu iki yöntem arasındaki temel farklılıkları ve potansiyel entegrasyon alanlarını araştırmışlardır. Çalışmada, Dijital İkiz modellerinin dinamik, gerçek zamanlı ve otonom yapısının vurgulandığı; geleneksel Ayrık Olay Simülasyonu modellerine kıyasla veri kullanımı, model geliştirme süreçleri ve otonom kontrol mekanizmalarındaki üstünlüklerinin ele alındığı belirtilmiştir. Özellikle, Dijital İkiz modellerinin sürekli veri akışı sağlayarak, fiziksel sistemle senkronize çalışmasının, gerçek zamanlı karar verme ve optimizasyon süreçlerine katkılar sağladığı detaylandırılmıştır. Ayrıca, çalışmada Dijital İkiz modellerinin, Endüstri 4.0 bağlamında daha geniş bir uygulama yelpazesi sunabileceği, ancak yaygın benimsenmesi için özel yazılım araçlarının ve standart uyumluluk çalışmalarının geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Aheleroff vd (2021), Dijital İkiz teknolojisinin, Endüstri 4.0 bağlamında sağladığı yenilikleri ve uygulama potansiyelini araştırmışlar, bu teknolojinin fiziksel ve dijital sistemler arasında çift yönlü veri akışı sağlayarak süreç optimizasyonuna katkı sağladığını vurgulamışlardır. Çalışmada, özellikle "Hizmet Olarak Dijital İkiz" yaklaşımının endüstriyel uygulamalara getirdiği esneklik ve ölçeklenebilirliği inceledikleri belirtilmiştir. Ayrıca, Dİ'nin referans mimari modelleri üzerinden fiziksel, dijital ve siber katmanların entegrasyonunun detaylandırıldığı ve bu entegrasyonun bireyselleştirilmiş ürün tasarımı ve üretim süreçleri üzerindeki etkilerinin ele alındığı ifade edilmiştir. Örnek olay incelemesi olarak sulak alanların bakımı ve yönetimi üzerinde duran çalışma, Dİ'nin Nesnelerin İnterneti, Büyük Veri, Bulut Bilişim ve AR teknolojileriyle desteklenerek çevresel ve operasyonel sorunlara yenilikçi çözümler sunabileceğini ortaya koymuştur.

Yasin vd. (2021), Avustralya’daki KOBİ’lerin, Endüstri 4.0’a geçişini kolaylaştırmak için düşük maliyetli ve basit bir dijital ikiz çerçevesi sunmayı amaçlamışlardır. Çalışmalarında, RTD sensörü, WAGO 750-8102 PLC, Node-Red, MySQL, Grafana ve 3DExperience kullanarak fiziksel bir varlığın dijital ikizini oluşturmuşlardır. Dijital

ikizin, gerçek zamanlı veri toplama, analiz ve görselleştirme yoluyla operasyonel verimliliği artırdığını ve karar alma süreçlerini iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Çalışmalarında, sensör verilerinin, IoT cihazlarıyla entegre edilebildiğini ve kullanıcıların 3D modeller üzerinden gerçek zamanlı verilere erişebileceğini belirlemişlerdir. Araştırmaları, KOBİ'lerin dijital dönüşümde karşılaştıkları teknolojik engelleri aşmalarına yardımcı olacak pratik bir yol haritası sunmuştur.

Serugendo vd. (2022), dijital ikizlerin kavramsal çerçevesinden başlayarak farklı endüstriyel uygulamalarını detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmada, dijital ikizlerin statik modellerden işlevsel, kendini uyarlayan ve akıllı dijital ikizlere evriminin ele alındığı ve bu dönüşümün endüstriyel faydalarına vurgu yapıldığı belirtilmiştir. Özellikle enerji sektöründe dijital ikizlerin kullanımına odaklanan araştırmanın, trafo merkezleri gibi kritik altyapılarda uluslararası standartların (örneğin, IEC 61850) entegrasyonunu ve bu standartların dijital ikizler üzerindeki etkisini değerlendirdiği ifade edilmiştir. Ayrıca, ontolojilerin dijital ikizler arası veri paylaşımı ve birlikte çalışabilirlikteki rolünün incelendiği çalışmada, veri kalitesi ve güvenliğinin, dijital ikizlerin başarısında kritik öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada, büyük ölçekli enerji sistemlerinin yönetiminde karşılaşılan ölçeklenebilirlik sorunları ve yapay zekâ tabanlı analitik yaklaşımlarının potansiyel çözümler sunduğu da ifade edilmiştir.

Farhadi vd. (2022), robotik delme süreçlerinde, dijital ikiz teknolojisinin uygulanabilirliğini araştırmışlar ve bu bağlamda, ISO 23247 standardına dayalı bir dijital ikiz çerçevesi geliştirmişlerdir. Çalışmada, robotik delme işlemlerinde karşılaşılan delik kalitesi ve konumlandırma hataları gibi sorunların üstesinden gelmek amacıyla gerçek zamanlı izleme, simülasyon ve süreç optimizasyonuna odaklanıldığı belirtilmiştir. Limerick Üniversitesi'nde KUKA KR210 R3100 Ultra robotu ve çok işlevli uç efektör kullanılarak deneysel bir sistem tasarlandığı, delme parametrelerinin görselleştirilmesi ve hata tahmini üzerine yoğunlaşıldığı ifade edilmiştir. Araştırmada, tork, dönüş hızı ve ilerleme gibi işlem parametrelerini izlemek ve optimize etmek için "PyQtGraph" kütüphanesiyle gerçek zamanlı veri görselleştirme süreçlerinin uygulandığı belirtilmiştir. Ayrıca, dijital ikiz çerçevesi kapsamında sensör ve aktüatörlerden alınan verilerin "Profinet/IO fieldbus" sistemi ile işlendiği ve robotik delme sürecinde kestirimci bakım ve süreç iyileştirme stratejilerinin geliştirildiği vurgulanmıştır.

Kim vd. (2022), Tel ve Ark Eklemeli İmalat (TAEİ) süreçlerinde, Dijital İkiz teknolojisinin kalite güvencesi ve süreç tekrarlanabilirliğini artırmadaki rolünü vurgulamışlardır. TAEİ'nin, metal eklemeli imalat için tel besleme, kaynak arkı ve robotik kontrol kullandığı, ancak termal dengesizlikler ve çatlaklar gibi kusurlar barındırma riski taşıdığı belirtilmiştir. Dijital İkiz teknolojisinin, ileri sensörler ve veri entegrasyonu aracılığıyla bu kusurları yöneterek süreç parametrelerini optimize ettiği ifade edilmiştir. Yazarların, Fiziksel İkiz ve Dijital İkiz katmanlarından oluşan bir uygulama mimarisi önerdikleri, Fiziksel İkiz'in sensörler aracılığıyla süreç verilerini topladığı, Dijital İkiz'in ise bu verileri analiz ederek karar destek mekanizmaları sunduğu belirtilmiştir. Bu yapının, gerçek zamanlı veri işleme ve süreç optimizasyonu sağlayarak TAEİ süreçlerinde, kalite güvencesini artırdığı vurgulanmıştır. Ayrıca, OPC UA tabanlı iletişim altyapısı ve CNN tabanlı model ile anormalliklerin tespit edildiği ve süreç parametrelerinin dinamik olarak ayarlandığı ifade edilmiştir.

Shao vd. (2023), çalışmalarında, dijital ikizlerin üretim süreçlerinde oynadığı kritik rolü ve bu teknolojinin güvenilirliğinin nasıl sağlanması gerektiğini ele almışlardır. Dijital ikizlerin, fiziksel sistemlerin doğru bağlama uygun ve güvenilir dijital temsillerini sunabilmesi için doğrulama, geçerlilik ve belirsizlik değerlendirme süreçlerinin uygulanmasının gerekliliğini vurgulamışlardır. Çalışmada, modelleme hataları, veri belirsizlikleri ve diğer sistematik sorunların yönetiminin öneminin ortaya konduğu ve bu süreçlerin dijital ikizlerin performansını artırmada temel bir etkiye sahip olduğunun belirtildiği ifade edilmiştir. Ayrıca, ISO 23247 gibi standartlar ve ASME VV50 yönergelerinin dijital ikizlerin geliştirilmesi, değerlendirilmesi ve uygulanması sırasında izlenmesi gereken yöntemler açısından rehberlik sunduğu ifade edilmiştir.

Spaney vd. (2023), üretim süreçlerini optimize etmek ve kaliteyi artırmak amacıyla model tabanlı bir Dijital İkiz mimarisi geliştirmeyi ele almışlardır. ISO 23247 standardına uygun olarak tasarlanan bu Dİ'nin, Siber-Fiziksel Üretim Sistemleri ile entegrasyon sağlamak için OPC UA protokollerini ve alan-spesifik dilleri kullandığı ifade edilmiştir. Çalışmada, verilerin toplanması, analiz edilmesi ve süreçlerin dinamik olarak uyarlanması sağlayan bileşen tabanlı bir yazılım mimarisi önerdiği belirtilmiştir. Dİ'nin, freze makinelerinin takım aşınması ve geometrik hatalarını izleyip telafi ederek üretim sürecini optimize ettiği vurgulanmıştır. Ayrıca, önerilen yaklaşımın, diğer üretim uygulamalarına kolayca uyarlanabilecek genel bir DT çerçevesi sunduğu ifade edilmiştir.

Liu vd. (2023), dijital ikizlerin bakım stratejilerindeki kullanımını değerlendirmek için bir çerçeve önermişlerdir. Sadakat, zekâ, zamanında güncelleme, entegrasyon ve standart uyumu kriterlerine dayalı olarak geliştirilen bu çerçevenin, dijital ikizlerin performansını artırmayı ve işletmelerin uygun dijital ikizleri seçmesine rehberlik etmeyi amaçladığı belirtilmiştir. Çerçeve, önleyici bakım için düşük sadakat ve zekâ seviyelerinin yeterli olduğunu, ancak koşul bazlı bakımda daha yüksek seviyelere ihtiyaç duyulduğunu ifade etmiştir. Ayrıca,

çerçevenin dijital ikizlerin doğruluk ve güvenilirliğini artırarak performans iyileştirmesi, sürdürülebilirlik ve endüstriyel standardizasyona katkı sağlamayı hedeflediği vurgulanmıştır.

Renard vd. (2023), dijital ikizlerin üretim sistemlerine entegrasyonunu anlamak ve uygulamak için bir çerçeve sunmuşlardır. Dijital ikizlerin, fiziksel ve sanal varlıklar arasındaki bağlantılar aracılığıyla veri toplama, analiz ve senkronizasyon sağlayarak süreç optimizasyonu, hata teşhisi, enerji verimliliği ve öngörücü bakım gibi işlevler sunduğu belirtilmiştir. Çalışma, dijital ikizlerin tarihsel gelişimini ve ISO 23247 standartlarına dayalı uygulamalarını inceleyerek, standartlaştırılmış ve bağlamsallaştırılmış veri toplamının önemi ile modüler ve ölçeklenebilir tasarımlara odaklandığı ifade edilmiştir. Araştırmanın, sanayi için etkili dijital ikiz çözümleri geliştirmeyi hedeflediği vurgulanmıştır.

Marinković vd. (2023), üretim ve dağıtım tesislerindeki iç taşıma sistemlerinin planlama ve süreç kontrolünde Dijital İkizlerin kullanımını incelemiştir. Dijital İkizlerin, sistem durumlarını simüle ederek ve optimal çözümleri araştırarak karar verme sürecini desteklediği; dinamik ve çok aşamalı taşıma sistemlerinin kaynak planlama ve kontrol zorluklarını ele aldığı belirtilmiştir. Çalışmada, sektörler arası uygulanabilir kullanım senaryoları tanımlanmış, standart işlevler belirlenmiş ve bir tasarım bilimi ve sistem mühendisliği yaklaşımıyla genel bir işlevsel ve mantıksal referans mimarisi geliştirilmiştir. Endüstriyel ortaklardan elde edilen bulguların geliştirilmiş ve uzman görüşmeleriyle doğrulanarak, Dijital İkizlerin uygulanması için standartlaştırılmış bir çerçeve sunulduğu, böylece çeşitli sektörlerde verimlilik ve uyum sağlama yeteneğinin artırıldığı vurgulanmıştır. Yasser vd. (2023), üretim ve dağıtım tesislerindeki iç taşıma sistemlerinin planlama ve süreç kontrolünde, Dijital İkizlerin kullanımını incelemiştir. Dijital İkizlerin, sistem durumlarını simüle ederek ve optimal çözümleri araştırarak karar verme sürecini desteklediği; dinamik ve çok aşamalı taşıma sistemlerinin kaynak planlama ve kontrol zorluklarını ele aldığı belirtilmiştir. Çalışmada, sektörler arası uygulanabilir kullanım senaryolarının tanımlandığı, standart işlevlerin belirlendiği ve bir tasarım bilimi ve sistem mühendisliği yaklaşımıyla genel bir işlevsel ve mantıksal referans mimarisinin geliştirildiği ifade edilmiştir. Endüstriyel ortaklardan elde edilen bulguların geliştirilmiş ve uzman görüşmeleriyle doğrulanarak, Dijital İkizlerin uygulanması için standartlaştırılmış bir çerçeve sunulduğu, böylece çeşitli sektörlerde verimlilik ve uyum sağlama yeteneğinin artırıldığı vurgulanmıştır.

Poechgraber vd. (2023), Dijital İkiz teknolojisinin, ürün geliştirme süreçlerinde erken aşamalarda kullanımını ve lojistik sistemlerdeki uygulanabilirliğini incelemiştir. DT'nin, sanal ve fiziksel sistemlerin entegre edilmesiyle süreç optimizasyonu ve öngörücü bakım olanakları sunduğu belirtilmiştir. Çalışma, gerçek bir lojistik sistemde DT'nin entegrasyonunu, veri toplama, simülasyon, çift yönlü iletişim ve optimizasyon süreçleriyle detaylandırmıştır. İlk sonuçlar, DT'nin süreç verimliliğini artırma ve karmaşık sistemlere adaptasyon potansiyelini ortaya koymuştur.

Shaimergenova vd. (2023), Katmanlı Üretim (KÜ) sürecinde, çeşitli malzemeler kullanarak nesnelerin katman katman oluşturulduğunu belirtmişlerdir. KÜ sürecindeki büyük veri sorunlarını çözmek ve dijitalleşmeyi desteklemek amacıyla veri odaklı Dijital İkiz teknolojisinin kullanıldığını ifade etmişlerdir. Çalışmada, KÜ için veri odaklı DI'nın performansını artırmayı hedefleyen yazılım arayüz katmanları (middleware) geliştirmişlerdir. "Middleware"nin veri akışını düzenleyerek fiziksel ve dijital modüller arasındaki iletişimi sağladığını açıklamışlardır. Çalışmalarında, "Microsoft Azure" platformunun güçlü özelliklerinden yararlanmışlar ve bir "middleware" mimarisi tasarlanmışlardır.

Wallner vd. (2023), dijital ikizlerin, esnek üretim hücrelerindeki rolünü ve uygulama süreçlerini ele almışlardır. Dijital ikizlerin, fiziksel sistemlerin dijital temsilleri olarak optimize etme, izleme ve yeniden yapılandırma gibi süreçlerde kritik bir işlev gördüğünü vurgulamışlardır. Çalışma, ISO 23247 standardını temel alarak dijital ikizlerin uygulama çabalarını azaltmak ve yaşam döngüsü değişikliklerine uyum sağlamak için bir yaşam döngüsü meta katmanı önermiştir. Özellikle, üretim gereksinimlerindeki düşük, orta ve yüksek frekanslı değişikliklerin dijital ikiz tasarımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Dijital ikiz uygulamalarının sürdürülebilirliğini artırmak için fiziksel ve dijital sistemlerin senkronizasyonuna odaklanılmış; robotik sistemlerde yol planlaması, çarpışma tespiti ve süreç optimizasyonu gibi işlevler simülasyonlarla desteklenmiştir. Çalışma, dijital ikizlerin esnek üretim süreçlerindeki verimliliği artırma ve değişiklikleri sorunsuz bir şekilde uygulama potansiyelini ortaya koymaktadır.

Risling vd. (2023), çalışmalarında, Almanya'nın ulusal hidrojen stratejisi kapsamında, elektrolizörlerin seri üretimi için dijital ikiz teknolojilerinin nasıl kullanılabileceğini ele almışlardır. Hidrojenin, geleceğin enerji taşıyıcısı olarak kritik bir rol oynayacağı ve Avrupa'nın 2050 yılı hidrojen talebini karşılayabilmek için Proton Değişim Membranlı elektrolizörlerin üretim kapasitesinin artırılmasının gerektiğini vurgulanmıştır. Ancak mevcut üretim süreçlerinin, manuel montaj nedeniyle yetersiz olduğunu belirtmişlerdir. Bu bağlamda, H2Giga-FRHY projesi üzerinden, üretim süreçlerinde dijitalleşmenin ve veri paylaşımının standartlaştırılması hedeflenmiş ve dağıtık üretim sistemleri için Varlık Yönetim Kabuğu temelli bir dijital ikiz yapılandırması sunulmuştur.

Klar vd. (2023), Dijital İkizlerin birlikte çalışabilirlik sorunlarına çözüm sunmayı hedefleyerek, standart referans mimariler geliştirilmesi ve bu sayede Dİ'lerin entegrasyonunun kolaylaştırılması üzerine çalışmışlardır. Araştırmalarında, dijital ikizlerin veri toplama, işleme, modelleme, simülasyon ve kontrol işlevlerinin uyum içinde çalışmasını sağlama ve birbirleriyle entegre olabilen sistem yaklaşımına odaklanmışlardır. ISO 23247 standardının, Dİ çözümlerinin üretimde uyumluluğunu artırmaya yönelik bir çerçeve sunarken, Birleşik Krallık merkezli Bilgi Yönetim Çerçevesinin, ulusal bir dijital ikiz ekosistemi oluşturmak için veri paylaşımı ve entegrasyonu sağlayan açık standartlar ve yönergeler geliştirdiğini belirtmişlerdir.

Ferko vd. (2023), üretim sektöründe Dijital İkiz teknolojilerinin benimsenmesini kolaylaştırmak için standartlaştırılmış referans mimarilerin önemine dikkat çekerek, özellikle ISO 23247 standardını ele almışlardır. Dİ'nin fiziksel varlıkların sanal kopyasını oluşturarak izleme, karar analizi ve risk tahmini işlevlerini desteklediğini belirten yazarlar, bu sistemlerin karmaşıklığının şirketler için bir zorluk oluşturduğunu vurgulamışlardır. ISO 23247, Dİ'nin veri toplama, senkronizasyon ve simülasyon gibi işlevlerini kapsayan dört katmanlı bir mimari sunarak uygulamaları yönetmeyi kolaylaştırdığını belirtmişlerdir.

Cabral vd. (2023), çalışmalarında Endüstri 4.0 bağlamında, Dijital İkiz teknolojisinin üretim süreçlerine entegrasyonunu ve bu teknolojinin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Araştırmada, bir Haas Mini Mill CNC makinesi temel alınarak, ISO 23247 standardına dayalı bir Dijital İkiz mimarisi geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Önerilen sistemin, makine durumu ve süreç verilerinin toplanıp bulut platformlarına aktarılması için MQTT ve MTConnect protokollerinden yararlandığı ifade edilmiştir. Uygulamanın, gerçek zamanlı veri toplama, izleme ve simülasyon işlevlerini yerine getirerek üretim süreçlerinin performansını artırmayı hedeflediği belirtilmiştir. Bu mimarinin, sadece incelenen makineyle sınırlı kalmayıp, diğer üretim süreçlerine ve makinelere de uyarlanabilirlik sunduğu vurgulanmıştır. Çalışma, Dijital İkiz teknolojisinin Endüstri 4.0 dönüşümünde sunduğu potansiyeli ve üretim süreçlerine sağladığı verimlilik artışını vurgulamıştır.

Saxby vd. (2023), dijital ikiz teknolojisinin, Endüstri 4.0 ve 5.0 bağlamında sağlık sektöründeki potansiyeline odaklanarak, özellikle nöromüskuloskeletal sağlık hizmetleri için kişiselleştirilmiş bir dijital ikiz çerçevesi önermişlerdir. Endüstriyel uygulamalar için ISO 23247 standardının temel bir çerçeve sunduğunu ancak sağlık sektörüne uygun olmadığını belirten yazarlar, biyolojik unsurların daha hassas takibini mümkün kılmak için bu standardı uyarlamışlardır. Çerçevenin; kullanıcı, dijital ikiz ve iletişim olmak üzere üç ana alan üzerine yapılandırıldığı ve insan ile cihazların dijital ikizlerle entegrasyonunu sağladığını belirtmişlerdir. Modelin, biyomekanik parametrelerin izlenmesini ve tedavi hedeflerinin belirlenmesini desteklerken, mühendislik varlıkları ve elektrofizyolojik verilerin entegrasyonu ile genişletmişlerdir. "Achilles" tendonu modellemesi ve nörorehabilitasyon cihazları gibi örneklerle uygulama alanlarını incelenmişlerdir.

Kibira vd. (2023), dijital ikiz teknolojisinin bir robot çalışma hücresine entegrasyonuna odaklanarak, üretim süreçlerini optimize etmek, kalite kontrol sağlamak ve kestirimci bakım gerçekleştirmek amacıyla ISO 23247 standardı çerçevesinde bir dijital ikiz çerçevesi sunmuşlardır. Çalışmalarında, "MTConnect" protokolü ile veri entegrasyonu, modelleme ve doğrulama süreçlerini ele almışlar ve küçük bir robot çalışma hücresinde uygulanan bu yaklaşımın, küçük ve orta ölçekli işletmeler için uygun maliyetli bir akıllı üretim çözümü sunduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, dijital ikizin üretim sistemlerine entegrasyonu için veri toplama, modelleme, entegrasyon ve doğrulama adımlarını içeren genel bir yol haritası oluşturmuşlardır.

Melo vd. (2024), Endüstri 4.0 kapsamında, Dijital İkiz teknolojisinin otomotiv montaj hattındaki gövde atölyesi süreçlerine uygulanmasını ele almışlardır. ISO 23247 standardına dayalı olarak tasarlanan Dİ mimarisinin, ölçüm istasyonlarından toplanan verilerle fiziksel süreçlerin dijital temsillerini oluşturarak, montaj sürecini gerçek zamanlı izleme, hataları erken tespit etme ve üretim süreçlerini optimize etme hedefleri taşıdığını belirtmişlerdir. Dİ'nin, lazer sensörler gibi cihazlarla, toplanan boyutsal verilerin analizini yaparak Sıfır Hata Üretimi stratejilerini desteklerken, RAMI 4.0 referans mimarisi ile uyumlu bir yapı sunduğunu açıklamışlardır.

Ferko vd. (2024), çalışmalarında, Dijital İkizlerin birlikte çalışabilirliğini artırma çabalarına odaklanarak, özellikle ISO 23247 referans mimarisi ve Varlık Yönetim Kabuğu bilgi modeli üzerinden önerilen bir çözüm sunmuşlardır. Bu çözümde, Yüksek Dereceli Dönüşümler kullanılarak, Dİ'lerde veri dönüşümleri otomatikleştirilmiş ve farklı modelleme dillerinin VYK ile entegrasyonunu sağlamışlardır. Araştırmalarında, Dİ'lerin veri alışverişinde karşılaşılan karmaşıklıkları çözmeyi amaçlayarak, bu sistemlerin daha verimli bir şekilde işleyebilmesi için Model GÜDÜMLÜ Mühendislik yaklaşımını benimsemişlerdir.

Caiza vd. (2024), bir üretim yürütme sisteminde endüstriyel süreç izleme ve kontrolü için bir dijital ikiz uygulanmasını önermişlerdir. Model tasarımı için, siber-fiziksel sistemler, üretim yürütme sistemi, robotik, Nesnelerin İnterneti, artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik ve açık platform iletişim-birleşik mimari (OPC UA) iletişim protokolleri, bu teknolojileri entegre etmek ve daha yüksek performans sağlayarak Dİ'nin işlevlerini geliştirmek için kullanmışlardır. Çalışmalarını, Festo Siber-Fiziksel Fabrika ve CP-Lab istasyonlarından oluşan bir Endüstri 4.0 laboratuvarında uygulamışlardır.

Caiza vd. (2024a), esnek üretim süreçlerinde, ISO 23247 çerçevesinde Dijital İkiz teknolojisinin entegrasyonunu inceleyerek Artırılmış Gerçeklik (AG) ve jest tabanlı kontrol sistemlerinin etkisini değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında, dört katmanlı bir Dİ modeli geliştirerek, Meta 2 AR gözlükleri, Unity yazılımı ve MQTT protokolü ile fiziksel-sanal etkileşimlerini yönetmişlerdir. “Senso Glove” jest tanıma teknolojisi sayesinde kullanıcılar, üretim süreçlerini AG ortamında doğrudan kontrol edebilmişlerdir. Üretim hattındaki Kartezyen kolun el hareketleriyle yönetildiği testlerde, %95 doğruluk oranı elde etmişlerdir. AG tabanlı Dİ sisteminin hata tespit ve düzeltme sürelerini geleneksel yöntemlere kıyasla 17 saniye iyileştirdiğini belirtmişler, üretim döngüsünü optimize ederek operasyonel verimliliği artırdığını vurgulamışlardır. Yazarlar, bulgularının Dİ sistemlerinin ISO 23247 çerçevesinde yapılandırılabilirliğini ve AG tabanlı etkileşimlerin süreç verimliliğine doğrudan katkı sağladığını ifade etmişlerdir.

Cabral vd. (2024), Katmanlı Üretim (KÜ) sürecine yönelik robotik hücrelerde Dijital İkiz teknolojisinin, ISO 23247 standardına dayalı bir uygulamasını ele almışlardır. Çalışmada, KÜ süreçlerinde fiziksel işlemlerin dijital bir kopyasını oluşturarak gerçek zamanlı izleme ve simülasyon yapma imkânı sağlayan bir Dİ sisteminin geliştirilmesine odaklanmışlardır. Bu amaçla, Brasília Üniversitesi’nde bir “ABB IRB 2600” robot kolu, bir konumlandırma masası ve kaynak makinesi gibi donanımlardan oluşan bir robotik hücre kullanmışlar; veri akışını Ethernet TCP/IP üzerinden MQTT protokolü ile sağlamışlardır.

Marino vd. (2024), küçük ve orta ölçekli işletmelerde (KOBİ’ler) Dijital İkiz teknolojisinin uygulanmasını ve mühendislik alanındaki dönüştürücü etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, Dijital İkiz’in ürün ve süreçlerin simülasyonu, analizi ve tahmini bakım gibi avantajları vurgulanmış; IoT ve AI gibi teknolojilerle entegrasyonunun KOBİ’lerde operasyonel verimlilik, maliyet azaltma ve inovasyonu nasıl desteklediği ortaya konmuştur. Karma yöntemli bir araştırma deseni kullanılarak literatür taraması ve SWOT analizi yapılmış, veri bütünleştirme, siber güvenlik ve beceri eksikliği gibi zorluklar tartışılmıştır. Sonuç olarak, Dijital İkiz’in KOBİ’lerde rekabet avantajı sağladığı ve dinamik mühendislik ortamında vazgeçilmez bir araç haline geldiği belirtilmiştir.

Kına vd. (2024), üniversite envanterinde kullanılan motorlu araçların kayıt ve takip sistemi için web tabanlı bir yazılım önermişlerdir. Bu yazılım yardımıyla araçların, bakım, muayene, sigorta v.d süreçlerin takibi yapılmıştır. Karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik önemli katkılar sağlamışlardır.

Zheng vd. (2025), geleneksel imalat KOBİ’lerinde veri odaklı dijital dönüşüm ve değer önerisi evriminin eş-evrimsel sürecini incelemiştir. Organizasyonel Bilgi İşleme Teorisi temel alınarak, altı KOBİ’den elde edilen nitel verilerle üç aşamalı bir dijital dönüşüm modeli geliştirilmiştir: (1) veri odaklı operasyonel mükemmellik, (2) veri senkronize tedarik zinciri entegrasyonu ve (3) veri katalizörlüğünde ekosistem inovasyonu. Dijital ikiz teknolojisi, özellikle üçüncü aşamada tahmine dayalı analitik ve simülasyonlar yoluyla veri entegrasyonu ve karar alma süreçlerini optimize etmede kritik bir rol oynamıştır. Tedarik zinciri aksamalarını öngörmek ve kaynak tahsisini iyileştirmek için kullanıldığı belirtilmiştir. Bulgular, dijital ikizlerin KOBİ’lerde operasyonel esneklik ve ekosistem uyumunu destekleme potansiyelini vurgularken, teknolojinin nicel etkileri ve uygulama engellerinin gelecekte araştırılması gerektiğini göstermektedir.

Link vd. (2025), çalışmalarında, sac metal şekillendirme süreçlerinde yerel sürtünme koşullarının parça kalitesine etkisini gerçek zamanlı tahmin ve optimize etmek için yapay zekâ destekli bir dijital ikiz modeli önermişlerdir. Sonlu elemanlar simülasyonlarıyla oluşturulan veri setlerini kullanarak, RES-SE-U-Net mimarisine sahip bir evrimsel sinir ağı eğitmişler ve parça geometrisi ile incelleme dağılımını tahmin etmek için kullanmışlardır. Dijital ikizin, kalite sapmalarını tespit ederek, parçacık sürüşü optimizasyonu algoritmasıyla en az ek yağlama ile düzeltme önerileri sunduğunu belirtmişlerdir.

Hasan vd. (2025) araştırmalarında, dijital ikiz teknolojisinin sağlık sektöründe verimliliği artırmak için potansiyel uygulamalarını incelemişler ve etkili bir şekilde uygulanmasına yönelik öneriler sunmuşlardır. Çalışmalarında, gerçek zamanlı sağlık izleme, açıklanabilir yapay zekâ tabanlı erken teşhisin, kişiselleştirilmiş tıp, simülasyon tabanlı aşılama, yapay zeka konum teknolojisi ve akıllı şehir uygulamaları gibi dijital ikiz teknolojilerinin, sağlık alanındaki rolünü değerlendirmişlerdir. Yapısal eşitlik modellemesini kullanarak 306 katılımcıdan toplanan verileri analiz etmişler ve dijital ikiz teknolojisinin hem bireysel hem de toplumsal sağlık üzerinde önemli katkılar sağladığı ortaya koymuşlardır. Dijital ikiz teknolojisinin hasta izleme, erken teşhis, kişiselleştirilmiş tedavi ve kaynak optimizasyonu gibi alanlarda sağlık hizmetlerinin kalitesini ve verimliliğini artırdığını gözlemlemişlerdir. Bitencourt vd. (2025), dijital ikizin, fiziksel sistemi kopyalayan ve çift yönlü veri akışına izin veren, sanal bir model oluşturmak için geliştirilen, yenilikçi bir teknoloji olduğunu belirtmişlerdir. Geleneksel bir modelin güvenilirliğini değerlendirmek için doğrulama ve geçerliliğin kullanıldığı bu nedenle gerçek dünya ortamlarında, verilen kararların, önceden test edilmesi, sonuçlarının önceden analiz edilmesi için dijital ikizin bir temel oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmalarında, Dİ’nin üretim uygulamalarında, doğrulama ve geçerliliğinin nasıl kullanıldığı ile ilgili sistematik bir literatür taraması yapmışlardır.

Dİ ile ilgili son beş yılda yapılan araştırmalar yukarıda özetlenmiştir. Bu araştırmaların sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Fiziksel İkiz'in sensörler aracılığıyla süreç verilerini topladığı, Dijital İkiz'in ise bu verileri analiz ederek karar destek mekanizmaları sunduğu ve bu yapının, gerçek zamanlı veri işleme ve süreç optimizasyonu sağladığı belirlenmiştir.
- Dİ teknolojisinin, Endüstri 4.0 dönüşümünde, üretim süreçlerinde verimlilik artışı sağlayacağı belirlenmiştir.
- Dİ'lerin üretim sürecinde, maliyet ve zaman tasarrufu sağladığı, ayrıca işletmelere süreç takibi, analiz ve optimizasyon gibi imkanlar sunduğu belirlenmiştir.
- Dİ'lerin üretim süreçlerinin dinamik olarak çizelgelenmesi ve yönlendirilmesinde büyük katkılar sağladığı tespit edilmiştir.
- Dİ ve Ayrık Olay Simülasyonu yaklaşımlarının birbirinden farklı olduğu, Dİ'lerin dinamik olarak süreci analiz ettiği belirlenmiştir.
- Enerji sektöründe, Dİ kullanımının, trafo merkezleri gibi kritik altyapılarda, uluslararası standartlara entegrasyon için önemli kolaylıklar sağladığı tespit edilmiştir.
- Veri kalitesi ve güvenliğinin, Dİ'lerin başarısında, kritik öneme sahip olduğu belirlenmiştir.
- Dİ'lerin, süreçlerde hata tahmini için etkin şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.
- ISO 23247 gibi standartlar ve ASME VV50 yönergelerinin, dijital ikizlerin geliştirilmesi, değerlendirilmesi ve uygulanması sırasında izlenmesi gereken yöntemler açısından rehberlik sunduğu tespit edilmiştir.
- Dijital ikizlerin bakım stratejilerinde etkin olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Üretim ve dağıtım tesislerindeki iç taşıma sistemlerinin planlama ve süreç kontrolünde, Dijital İkizlerin etkin olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Dijital İkiz teknolojisinin, ürün geliştirme süreçlerinde, erken aşamalarda kullanılabileceği ve lojistik sistemlerde etkili olduğu tespit edilmiştir.
- Katmanlı Üretim sürecinde, büyük veri sorunlarını çözmek ve dijitalleşmeyi desteklemek amacıyla veri odaklı Dijital İkiz teknolojisinin kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Dİ'lerin, esnek üretim hücrelerinde etkin bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Sağlık sektöründe, sağlık hizmetleri için kişiselleştirilmiş bir dijital ikiz çerçevesi kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Dijital ikiz teknolojisinin hasta izleme, erken teşhis, kişiselleştirilmiş tedavi ve kaynak optimizasyonu gibi alanlarda, sağlık hizmetlerinin kalitesini ve verimliliğini artırdığı belirlenmiştir.
- Dijital İkiz teknolojisinin, otomotiv montaj hattındaki süreçlerin analiz edilmesinde kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Üretim yürütme sisteminde, endüstriyel süreç izleme ve kontrolü için Dİ'lerin etkili şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Dijital İkiz'in KOBİ'lerde rekabet avantajı sağladığı ve dinamik mühendislik ortamında vazgeçilmez bir araç haline geldiği tespit edilmiştir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Dijital ikizler, sanal siber uzay ile fiziksel varlıkları izleme yetenekleri, "ne olurdu" simülasyonları ve senaryoları gerçekleştirme veya gelecekteki çalışmalar için dijital bir anlık görüntü sağlama özellikleri sayesinde, Endüstri 4.0 ve 5.0'ın temel unsurları ve geleceğin yenilikçi omurgası olarak kabul edilmektedir. Buna rağmen, küçük ve orta ölçekli üreticiler (KOBİ'ler) için dijital ikiz uygulaması çeşitli zorluklar barındırmaktadır. Bu zorluklar arasında uzmanlık ve kaynak eksikliği, dijital ikizlerin sağlayabileceği potansiyel faydaların yeterince anlaşılabilmesi ve bu alandaki teknoloji ve standartlar hakkında bilgi eksikliği gibi unsurlar yer alır. Ayrıca, günümüzde geliştirilen dijital ikizlerin çoğu, belirli varlıklar için tasarlanmış olup, üretim optimizasyonu veya kestirimci bakım gibi belirli hedeflere odaklanmaktadır. Dijital ikizlerin bu sınırlı uygulama alanları, yeni kullanım senaryolarına, örneğin enerji verimliliği ya da üretim takibi gibi konulara, uyarlanmasını zorlaştırmaktadır. Dijital ikizlerin geliştirilmesine yönelik mevcut deneyimler, yeni kullanım senaryolarına tam anlamıyla uygulanamamaktadır.

Dİ'lerin benimsenmesini hızlandırmak ve oluşturulmasını, işlenmesini ve entegrasyonunu kolaylaştırmak için birden fazla standart dikkate alınmalıdır. Dİ'lerin başarısı, büyük ölçüde standartlaştırılmış bir modele ve Dİ'lerle etkileşimde kullanılacak standartlaştırılmış arabirimlere dayanır. Dİ bileşenlerinin yeniden kullanılabilirliğini ve genişletilebilirliğini sağlamak için, bir Dİ'nin yapı taşlarının standartlaştırılması gereklidir. Ayrıca, veri egemenliği standartları, Dİ'lerin hassas bilgilerinin şirket sınırları içinde dikkatlice yönetilmesi, değiş tokuş edilen bilgilerin gizliliğini korumak ve kötüye kullanımı engellemek için kritik öneme sahiptir.

Dijital ikizler, geçmişini analiz etmek yerine üretim sistemlerinin ve süreçlerinin gelecekteki davranışlarını tahmin etme konusunda büyük bir potansiyel sunmaktadır. Uygun ekipmanlarla birleştiğinde, Dİ'den elde edilenler yapılan yatırımdan daha fazlasını elde etmek mümkün olmaktadır. Bu nedenle, süreçlerin ve uygulamalarının daha verimli hale getirilmesi için süregelen bir çaba vardır. Çeşitli ortamlar ve kontrol yaklaşımlarını gözlemleyerek hedeflenen sonuca ulaşılabilen çözümlerin uygulanması, şaşırtıcı değildir. Bu çeşitlilik, çözüm uygulamasında ek gereksinimler getirebilir, bu da maliyetin, gereken zamanın veya personelin artmasına neden olabilir. Bu nedenle, tasarımdan devreye alma süresini mümkün olduğunca kısa tutmak için de çaba sarf edilmektedir.

Ancak Dİ'ler için terimler, mimari ve modellerle ilgili standartların eksikliği, kullanıcıların Dİ'leri etkinleştiren uygulamaları geliştirirken Dİ'leri farklı şekilde anlamalarına yol açmakta ve farklı şirketler veya alanlar arasında veri, modeller ve hizmetlerin bağlantısını gerçekleştirmeyi zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, Dİ'lerin standartlaştırılmış referans mimarilere göre geliştirilmesi, benimsenmelerini sağlamak ve bunların oluşturulmasını, işlenmesini ve entegrasyonunu kolaylaştırmak için gelecekte daha yoğun çalışmaların yapılması gerekir.

KAYNAKÇA

1. Aheleroff, S., Xu, X., Zhong, R. Y., & Lu, Y. (2021). Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model. *Advanced Engineering Informatics*, 47. doi:https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101225
2. Aheleroff, S., Zhong, R., & Xu, X. (2020). A Digital Twin Reference for Mass Personalization in Industry 4.0. *ScienceDirect*, 228–233. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> adresinden alındı
3. Aydoğmuş, U.; Engin, O. (2021). Endüstri 4.0 Sürecinde Ağırlama Sektörüne Yönelik Uygulamaların İncelemesi. *İstanbul Aydın Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 13(3), 851-874. DOI: 10.17932/IAU.IAUSBD.2021.021/iausbd_v13i3013
4. Brandstetter, A., Risling, M., Himmelstoss, H., Schel, D., & Oberle, M. (2023). Towards A Design Of A Software-Defined Manufacturing System. *Conference on Production Systems and Logistics*, 479-488. doi:https://doi.org/10.15488/13466
5. Bitencourt, J., Wooleyb, A., Harrisa G. (2025). Verification and validation of digital twins: a systematic literature review for manufacturing applications, *International Journal of Production Research*, 63, 1, 342–370. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2357741>
6. Cabral, J. V., Alvares, J. A., & Carvalho, G. C. (2024). Digital Twin Implementation for Additive Manufacturing Robotic Cell based on ISO 23247 Standard. *IEEE Latin America Transactions*, 651-658.
7. Cabral, J., Rodriguez, E., & Alvares, A. (2023). Digital Twin Implementation for Machining Center. *IEEE Latin America Transactions*, 628-635.
8. Caiza, G., & Sanz, R. (2024). An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing. *Applied Sciences*, 2-20. doi:https://doi.org/10.3390/app14104125
9. Caiza, G., & Sanz, R. (2024a). Immersive Digital Twin under ISO 23247 Applied to Flexible. *Applied Sciences*, 14, 10, 1-19. doi:https://doi.org/10.3390/app14104204
10. Engin, O., Sarıcan, B. (2024). Makine Çizelgeleme Problemlerinin Çözümünde Pekiştirmeli Öğrenme Etkisinin Analizi, *ALKU Journal of Science*, 6(2): 116-140. <https://doi.org/10.46740/alku.1390397>
11. Fadaie, R., Sinderen, M. V., & Silva, P. A. (2022). Towards a Digital Twin for Simulation of Organizational and. *IEEE Access*, 51-110. https://www.researchgate.net/publication/360237553_Towards_a_Digital_Twin_for_Simulation_of_Organizational_and_Semantic_Interoperability_in_IDS_Ecosystems adresinden alındı
12. Farhadi, A., Lee, S. H., Hinchy, E. P., O'Dowd, N. P., & McCarthy, C. T. (2022). The Development of a Digital Twin Framework for an Industrial Robotic Drilling Process. *Sensors* 22. doi:https://doi.org/10.3390/s22197232
13. Ferko, E., Berardinelli, L., Bucaioni, A., Behnam, M., & Wimmer, M. (2024). Towards Interoperable Digital Twins: Integrating SysML into AAS with Higher-Order Transformations. *IEEE 21st International Conference on Software Architecture Companion*, 342-349. doi:10.1109/ICSA-C63560.2024.00063

- 14.Ferko, E., Bucaioni, A., Pelliccione, P., & Behnam, M. (2023). Standardisation in Digital Twin Architectures in. *International Conference on Software Architecture (ICSA)*, 70-81. doi:10.1109/ICSA56044.2023.00015
- 15.Hasan, M. A., Mustofa, R., Hossain, N. U. I., Islam, M. S. (2025). Smart health practices: Strategies to improve healthcare efficiency through digital twin technology. *Smart Health*, 36, 100541. <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2025.100541>
- 16.Jacoby, M., Volz, F., Weißenbacher, C., Stojanovic, L., & Usländer, T. (2021). An approach for Industrie 4.0-compliant and data-sovereign Digital Twins. *De Gruyter*, 1052-1060. doi: <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0074>
- 17.Kına, E., Biçek, E., İnan, M., Gümüş, O., Alkan A. U. (2024). Üniversitelerde Dijital Araç Yönetimi: Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Örneğiyle Web Tabanlı Araç Takip ve İzleme Sistemi. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, JONAS, 7 (2): 98-111. DOI: 10.55930/jonas.1592290
- 18.Kına, E. (2025). TLEABLCNN: Brain and Alzheimer's Disease Detection Using Attention-Based Explainable Deep Learning and SMOTE Using Imbalanced Brain MRI. *IEEE, Access*, 13, 27670-27683. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3539550
- 19.Kibira, D., Shao, G., & Venketesh, R. (2023). Building A Digital Twin of an Automated Robot Workcell. *National Institute of Standards and Technology*, 196-207.
- 20.Kim, D. B., Shao, G., & Jo, G. (2022). A digital twin implementation architecture for wire + arc additive. *Manufacturing Letters*, 1-5. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.08.008>
- 21.Klar, R., & Angelakis, V. (2023). Standardized and Interoperable Digital Twins. *IEEE Conference on Standards for Communications and Networking*, 382. doi:10.1109/CSCN60443.2023.10453189
- 22.Kumaş, E., & Erol, S. (2021). Endüstri 4.0'da Anahtar Teknoloji Olarak Dijital İkizler. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 691-701.
- 23.Link, P., Penter, L., Rückert, U., Klingel, L., Verl, A., & Ihlenfeldt, S. (2025). Real-time quality prediction and local adjustment of friction with digital twin in sheet metal forming. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 91, 102848.
- 24.Liu, J., Liu, X., Vatn, J., & Yin, S. (2023). A generic framework for qualifications of digital twins in maintenance. *Journal of Automation and Intelligence*, 197-203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jai.2023.07.002>
- 25.Manzak, R., Engin, O. (2023). Akıllı fabrikalarda çizelgeleme yöntemlerinin analizi, *Verimlilik Dergisi*, 57(4), 761-774. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.1136778>
- 26.Marinković, M., Galka, S., & Meißner, S. (2023). Digital Twins for Internal Transport Systems: Use Cases, Functions, and. *Proceedings of the 56th Hawaii International Conference on System Sciences*, 1195-1204. <https://hdl.handle.net/10125/102777> adresinden alındı
- 27.Marino, A., Pariso, P., & Picariello, M. (2024). Digital twin in SMEs: Implementing advanced digital technologies for engineering advancements. In *Macromolecular Symposia*, 413, 3, 2300176).
- 28.Melo, V., Barbosa, J., Mota, G., & Leitao, P. (2024). Design of an ISO 23247 Compliant Digital Twin. *IEEE 7th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. doi:10.1109/ICPS59941.2024.10640052
- 29.Noga, M., Juhás, M., & Gulán, M. (2022). Hybrid Virtual Commissioning of a Robotic Manipulator with. *Sensors*, 1-17. doi:<https://doi.org/10.3390/s22041621>
- 30.Poechgraber, G., Bougain, S., Wallner, B., Bohaty, G., Trautner, T., & Bleicher, F. (2023). Introduction of a Digital Twin for the Product. *International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*. doi:10.1109/EMCTECH58502.2023.10297012
- 31.Reed, S., Löfstrand, M., & Andrews, J. (2021). Modelling cycle for simulation digital twins. *Manufacturing Letters* 28, 54-58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.04.004>
- 32.Renard, D., Saddem, R., Annebicque, D., & Riera, B. (2023). Painting of the digital twin to better understand and implement it in manufacturing. *Prosyst/CRESTIC*, 1-25. doi:<https://doi.org/10.3390/app14104125>
- 33.Risling, M., Himmelstoss, H., Brandstetter, A., Shi, D., & Bauernhansl, B. (2023). Bridging The Gap: A Framework For Structuring The Asset Administration Shell In Digital Twin Implementation For Industry 4.0. *Conference on Production Systems and Logistics*, 760-770. doi:<https://doi.org/10.15488/15286>
- 34.Saxby, D., Pizzolato, C., & Diamond, L. (2023). A Digital Twin Framework for Precision Neuromusculoskeletal. *Human Kinetics, Inc.*, 347-354. doi:<https://doi.org/10.1123/jab.2023-0114>
- 35.Serugendo, G. D., Decelle, A.-F. C., Guise, L., Cormenier, T., Khan, I., & Hossenlopp, L. (2022). Digital Twins: From Conceptual Views to Industrial Applications in the Electrical Domain. *IEEE Latin America Transactions*. doi: 10.1109/MC.2022.3156847
- 36.Shaimergenova, K., Ali, M. H., & Shehab, E. (2023). Development of Middleware for Data-Centric Digital Twin of Additive Manufacturing. *IEEE Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 412-415. doi:10.1109/SIST58284.2023.10223565

37. Shao, G. (2021). Use Case Scenarios for Digital Twin Implementation Based on ISO 23247. *NIST Advanced Manufacturing Series*, 400-2. doi:https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.400-2
38. Shao, G., & Helu, M. (2020). Framework for a digital twin in manufacturing: Scope and requirements. *Manufacturing Letters*, 105-107. doi: https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.04.004
39. Shao, G., Hightower, J., & Schindel, W. (2023). Credibility Consideration for Digital Twins in Manufacturing. *Manufacturing Letters*, 24-28. doi: https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.11.009
40. Spaney, P., Becker, S., Ströbel, R., Fleischer, J., Zenhari, S., Splettstößer, A.-K., & Wortmann, A. (2023). A Model-Driven Digital Twin for Manufacturing Process Adaptation. *ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C)*, 465-469. doi:10.1109/MODELS-C59198.2023.00081
41. VanDerHorn, E., Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: Generalization, characterization and implementation, *Decision Support Systems*, 145, 1- 11, 113524. https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524
42. Verdecchia, R., Scommegna, L., Vicario, E., & Pecorella, T. (2023). Network Digital Twins: Towards a Future Proof. *Proceedings of the 2023 International Conference on Network and Service Management*, 1-10.
43. Wallner, B., Zwölfer, B., Trautner, T., & Bleicher, F. (2023). Digital Twin Development and Operation of a Flexible Manufacturing Cell using ISO 23247. *Procedia CIRP*, 1149-1154. doi:10.1016/j.procir.2023.09.140
44. Yasser, A., & Broberg, A. (2023). Digital Twins for Verification and Validity. *Chalmers University of Technology*, 4-22.
45. Yasin, A., Pang, T. Y., Cheng, C. T., & Miletic, M. (2021). A roadmap to integrate digital twins for small and medium-sized enterprises. *Applied Sciences*, 11(20), 9479.
46. Yiğit, G.; Engin, O. (2025). Endüstri 5.0 ile Sürdürülebilirliğin sağlanması: Bir Bibliyometrik Analiz. *İstanbul Aydın Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 17(1), 23-46. 10.17932/IAU.IAUSBD.2021.021/iausbd_v17i1002
47. Zheng, J., Zhang, J. Z., Kamal, M. M., & Mangla, S. K. (2025). A Dual Evolutionary Perspective on the Co-Evolution of Data-Driven Digital Transformation and Value Proposition in Manufacturing SMEs. *International Journal of Production Economics*, 109561.