Technological Applied Sciences
ISSN: 1308 7258
Article ID: 2A0202

Status : Research Article
Received: 07.06.2024
Accepted: 10.01.2025

Cevdet Emin Ekinci
Fırat University, cee@firat,edu.tr, Elazığ-Türkiye
Özgür Aydın
Bingöl University, oaydin@bingol.edu.tr, Bingöl-Türkiye

DOI	http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2025.20.1.2A0202	
ORCID ID	0000-0002-7114-4832	0000-0001-8130-277X
Corresponding Author	Cevdet Emin Ekinci	

YAPILARIN DİJİTAL İKİZLERİ: KAPSAMLI BİR GENEL BAKIŞ

ÖZ

Bu çalışma, modern mimarlık ve inşaat mühendisliğinde giderek artan önemine paralel olarak yapıların dijital ikizleri kavramını kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Dijital ikizler, fiziksel bir yapının sensör verileriyle gerçek zamanlı olarak güncellenen dinamik ve sanal kopyalarıdır. Giriş bölümünde kavramın derinlemesine tanımı, tarihsel gelişimi ve günümüz yapı sektöründeki önemi vurgulanmaktadır. İkizin temel bileşenleri olan fiziksel varlık, BIM tabanlı dijital model ve IoT destekli gerçek zamanlı veri akışı detaylandırılmıştır. Bu bileşenlerin entegrasyonuyla elde edilen veriler, yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmalarıyla analiz edilmekte, enerji ve yapısal performans simülasyonlarıyla desteklenmektedir. Dijital ikizlerin tasarım, inşaat, işletme ve bakım aşamalarındaki faydaları arasında enerji verimliliği, tahmine dayalı bakım, güvenlik artışı ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkı bulunmaktadır. Karşılaşılan veri entegrasyonu, maliyet ve uzman personel gibi zorluklara rağmen, şehir ölçeğinde dijital ikizler ve blockchain entegrasyonu gibi gelecek trendleri, bu teknolojinin yapı sektöründe devrim yaratma potansiyelini pekiştirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dijital İkiz, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), Nesnelerin İnterneti (IoT), Akıllı Binalar, Yapısal Sağlık İzleme

DIGITAL TWINS OF STRUCTURES: A COMPREHENSIVE OVERVIEW

ABSTRACT

This study provides a comprehensive overview of the concept of digital twins of buildings, examining their growing importance in modern architecture and civil engineering. Digital twins are dynamic, virtual replicas of physical structures that are continuously updated with real-time sensor data. The introduction provides an in-depth definition of the concept, outlines its historical development, and explains its current significance in the construction industry. It details the core components of a digital twin: the physical asset, the BIM-based digital model, and the IoT-enabled real-time data flow. Data obtained through the integration of these components is analysed using artificial intelligence and machine learning algorithms, with energy and structural performance simulations providing further support. The benefits of digital twins in the design, construction, operation, and maintenance phases include enhanced energy efficiency, predictive maintenance, increased safety, and contributions to sustainability goals. Despite challenges such as data integration, cost, and the need for specialised personnel, future trends such as city-scale digital twins and blockchain integration reinforce the potential of this technology to transform the construction sector.

Keywords: Digital Twin, Building Information Modeling (BIM), Internet of Things (IoT), Smart Buildings, Structural Health Monitoring

How to Cite:
Ekinci, C.E. ve Aydın, Ö., (2025). Yapıların dijital ikizleri: kapsamlı bir genel bakış. 20(1):13-37, DOI: 10.12739/NWSA.2025.20.1.2A0202.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dijital ikiz kavramı, son yıllarda endüstriyel ve teknolojik alanlarda giderek daha fazla önem kazanan bir paradigma haline gelmiştir. Özellikle inşaat sektöründe, karmaşık projelerin yönetimi, artan çevresel düzenlemeler ve sürdürülebilirlik hedefleri, bu yenilikçi teknolojinin benimsenmesini hızlandırmıştır. Yapıların dijital ikizleri, fiziksel bir yapının sanal, gerçek zamanlı bir kopyası olarak tanımlanır ve projenin tasarım aşamasından başlayarak tüm yaşam döngüsü boyunca değerli içgörüler sunar.

Dijital ikiz (DT=Digital Twin), basit bir sanal modelin ötesinde, fiziksel bir varlığın gerçek zamanlı verilerle beslenen, dinamik ve canlı bir dijital replikasyonudur [1]. Bu tanım, dijital ikizi statik bir 3D modelden (örneğin, bir BIM modeli) ayırır. Fiziksel yapının üzerine yerleştirilen sensörler aracılığıyla sürekli olarak toplanan performans, çevresel ve operasyonel veriler, dijital ikize aktarılır ve sanal kopyanın fiziksel varlığın anlık durumunu, davranışını ve etkileşimlerini yansıtmasını sağlar [2]. Böylece, dijital ikiz sadece bir görsel temsil değil, aynı zamanda yapının "nefes alan" bir yansımasıdır; geçmiş davranışlarını anlamamıza, mevcut durumunu analiz etmemize ve gelecekteki performansını tahmin etmemize olanak tanır [3]. Bu karşılıklı etkileşim, dijital ikizin en güçlü özelliklerinden biridir: fiziksel dünyadan veri alır, bu verileri işleyerek sanal ortamda analiz ve simülasyon yapar, elde ettiği içgörüleri tekrar fiziksel dünyaya yansıtarak operasyonel optimizasyon ve bilinçli karar alma süreçlerini destekler [4].

Dijital ikiz kavramının kökenleri, ilk olarak 2002 yılında Dr. M.Grieves tarafından Michigan Üniversitesi'nde ürün yaşam döngüsü yönetimi (PLM) alanında ortaya atılmıştır [5]. Başlangıçta **"fiziksel alan modeli"**, **"sanal alan modeli"** ve **"bilgi akışı"** olarak tanımlanan bu kavram, daha sonra NASA'nın uzay aracı yönetiminde, özellikle Apollo programında kullanılan **"ikizleme"** yaklaşımlarına benzerliğiyle dikkat çekmiştir [6]. NASA, uzaydaki araçların yerdeki bir kopyasını bulundurarak, gerçek zamanlı sorun giderme ve performans analizi yapmıştır. Ancak **"Dijital İkiz"** terimi ve günümüzdeki anlamıyla yaygınlaşması, 2010'lu yılların ortalarından itibaren **Nesnelerin İnterneti** (IoT), yapay zeka (AI) ve büyük veri teknolojilerindeki hızlı gelişmelerle ivme kazanmıştır [7]. Bu teknolojik gelişmeler, dijital ikizlerin sadece üretim ve havacılık gibi sektörlerde değil, aynı zamanda yapı sektörü, sağlık, enerji gibi çok çeşitli alanlarda uygulanabilirliğini artırmıştır.

Günümüz yapı sektörü, çeşitli ve giderek artan karmaşık zorluklarla karşı karşıyadır. Bunlar arasında projelerin artan karmaşıklığı, bütçe ve zaman aşımları, iş güvenliği riskleri, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine uyum zorunluluğu, yaşam döngüsü maliyetlerinin yüksekliği ve çevresel etkilerin azaltılması baskısı yer almaktadır [8]. Dijital ikizler, bu zorlukların üstesinden gelmek için bazı güçlü bir çözümler sunabilmektedir.

Örneğin;

- **Verimlilik ve Optimizasyon:** Yapının performansını gerçek zamanlı izleyerek enerji tüketimini optimize eder, operasyonel maliyetleri düşürür ve kaynak israfını azaltır [9].
- **Güvenlik ve Risk Yönetimi:** Yapısal bütünlük izleme ile potansiyel hasarları veya zayıflıkları erken aşamada tespit ederek olası afet risklerini minimize eder ve can güvenliğini artırır [10].
- **Sürdürülebilirlik:** Binaların karbon ayak izini azaltmaya yönelik stratejileri destekler, çevresel performansın sürekli iyileştirilmesine olanak tanır [11].

- **Bilinçli Karar Alma:** Toplanan kapsamlı veriler ve yapılan analizler sayesinde, paydaşların (bina sahipleri, yöneticiler, mühendisler) verilere dayalı, daha akıllı ve proaktif kararlar almasını sağlar [12].
- **Yaşam Döngüsü Boyunca Değer:** Tasarım aşamasından başlayarak inşaat, işletme, bakım ve hatta yıkım süreçlerine kadar yapının tüm yaşam döngüsü boyunca sürekli bir değer akışı sağlar [13].

Türkçe yapılan çalışmalar, yapıların dijital ikizlerinin (DT) Türkiye'deki uygulamaları ve araştırma eğilimlerini kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır. Bu çalışmaların büyük bölümü yapı bilgi modelleme (BIM) ile dijital ikiz entegrasyonu, kültürel miras yapıların korunması, akıllı tesis yönetimi ve yapısal sağlık izleme konularına odaklanmaktadır. Örneğin; Hoşacoğlu (2022), BIM'den dijital ikize geçişin tesis yönetiminde %30 oranında verim artışı sağladığını rapor etmiştir [14]. Yiğit ve Uysal (2024), insansız hava aracı (UAV) destekli dijital ikiz kullanarak kültürel miras binalarında %92 doğrulukla çatlak tespiti gerçekleştirmiştir [15]. Benzer şekilde Özcan ve Akay (2022), Paşabağ Peri Bacaları'nın dijital ikizini oluşturarak metaverse ortamında %30 daha fazla ziyaretçi etkileşimi sağlamıştır [16]. SWOT analizine dayalı çalışmalarda ise dijital ikizlerin yüksek yatırım maliyetine rağmen uzun vadede ciddi ekonomik ve operasyonel faydalar sunduğu belirlenmiştir [17]. Ayrıca yapıların bakım süreçlerinde dijital ikiz kullanımı sayesinde zaman maliyetinde %40 azalma sağlandığı, iş yükünde %25 oranında azalma yaşandığı [14] görülmüştür. Genel olarak Türkçe literatür, dijital ikiz teknolojisinin Türkiye'de özellikle bakım, kültürel miras koruma ve tesis yönetimi gibi uygulamalarda yaygınlaşmaya başladığını; bununla birlikte standart eksikliği, yüksek başlangıç maliyeti ve veri entegrasyonu gibi önemli zorlukların sürdüğünü ortaya koymaktadır.

İngilizce çalışmalar ise yapı sektöründe dijital ikiz uygulamalarının daha geniş ve çeşitlendirilmiş kullanım alanlarına sahip olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalar ağırlıklı olarak enerji optimizasyonu, öngörücü bakım, yapısal sağlık izleme ve yapay zekâ ile entegrasyon gibi konulara odaklanmaktadır. Örneğin, Ni ve arkadaşları (2023), derin öğrenme ve dijital ikiz kullanarak tarihi bir binada enerji tüketimini %15 oranında azaltmıştır [18]. Ritto ve Rochinha (2020), fizik tabanlı modelleme ve makine öğrenimi kombinasyonu ile gerçek zamanlı hasar tespitini başarılı şekilde uygulamıştır [19]. Birçok çalışma (Boje ve ark., 2020 [20]; Khajavi ve ark., 2020 [21]), dijital ikiz sistemlerinde anlamsal veri yapılarına ve veri standartlarının geliştirilmesine olan ihtiyacı vurgulamaktadır. Ayrıca kültürel miras yönetimi kapsamında yapılan uygulamalar [22], dijital ikizlerin bakım süreçlerinin etkinliğini ve güvenliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Drone tabanlı 3D yeniden yapılandırma ve dijital ikiz entegrasyonu ile yapıların santimetre düzeyinde hassasiyetle modellenmesi mümkün olmuştur [23]. Genel olarak İngilizce literatür, dijital ikizlerin enerji yönetimi ve bakım süreçlerinde olgunlaşmış uygulamalar sunduğunu, gerçek zamanlı veri entegrasyonunun önemini ve yapay zekâ destekli çözümlerin yükselen rolünü ortaya koymakta; bununla birlikte standart eksiklikleri ve veri güvenliği gibi bazı temel sorunların devam ettiğini de belirtmektedir.

Son yıllarda yapıların dijital ikiz teknolojisiyle bütünleşmesi, mimarlık ve inşaat mühendisliği alanında önemli ilerlemelere yol açmıştır. Türkiye'de yapılan çalışmalar, dijital ikizlerin yapı yaşam döngüsü yönetiminde karar desteği ve sürdürülebilirlik sağladığını vurgulamaktadır. Örneğin, Akanmu vd. (2021) dijital ikizlerin yapı yaşam döngüsüne entegrasyonunu analiz etmiş ve bu teknolojinin maliyet ve zaman tasarrufu sağladığını belirtmiştir [24]. Benzer şekilde PlanARCH (2022),

Türkiye'deki uygulamaları inceleyerek sürdürülebilirlik ve bütüncül yönetim açısından DT'nin katkılarını göstermiştir [25]. Çalış Duman (2022), işletmeler ve yapı sektöründe dijital ikizlerin verimlilik ve kalite artışına katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur [26]. TUCSA (2023), DT'nin bakım ve onarım süreçlerinde veri odaklı karar alma mekanizmalarını geliştirdiğini vurgulamıştır [27]. Ceylan (2021) ise BIM ile entegrasyonun dijital ikiz uygulamalarında kritik bir adım olduğunu ve karar destek sistemlerini güçlendirdiğini ifade etmiştir [28]. Uluslararası literatürde de yapı sağlığı izleme ve bakım süreçlerinde dijital ikiz teknolojisinin önemli katkıları ortaya konmaktadır. Örneğin, Xu vd. (2023), BIM ve gerçek zamanlı 3D tarama verilerini entegre ederek geliştirdikleri DT modelinin büyük yapısal değişikliklerin erken tespitine olanak sağladığını göstermiştir [29]. Deprem sonrası yapı durumu değerlendirmesi üzerine çalışan Hoskere vd. (2022), DT tekniklerinin acil müdahale süreçlerinde doğruluğu artırdığını belirtmiştir [30]. Sensors Editorial Board (2024) ise, DT'nin bakım ve izleme süreçlerindeki potansiyelini detaylı bir derleme ile sunmuştur [31]. Hosamo vd. (2022), binalarda arıza tespiti için DT destekli sistemlerin donanım ve yazılım eksikliklerine rağmen bakım maliyetlerini azaltma potansiyeline sahip olduğunu vurgulamıştır [32]. Ayrıca Zhang vd. (2024), DT mimarilerinin yapı süreçlerinde kullanımına dair veri kalitesi, entegrasyon ve güvenlik gibi kritik zorlukları ele almıştır [33]. Tüm bu çalışmalar, dijital ikizlerin mimarlık ve inşaat mühendisliği uygulamalarında veri odaklı ve proaktif bir yönetim yaklaşımı sunduğunu ve bu alanda gelişimin sürdüğünü göstermektedir.

Son on yılda yapılan benzer çalışmalar, dijital ikiz teknolojisinin inşaat mühendisliği ve özellikle yapı sağlığı izleme, bakım, arıza tespiti, sürdürülebilirlik gibi alanlarda ciddi katkı sağladığını göstermektedir. Türkçe literatürde [24, 25, 26, 27 ve 28] DT'nin veri entegrasyonu, karar desteği, maliyet ve zaman tasarrufu sağlama özellikleri vurgulanırken; uluslararası çalışmalar [29, 30, 31, 32 ve 33], özellikle BIM entegrasyonu, 3D gerçek zamanlı taramaların kullanılması, deprem sonrası değerlendirmeler, fault detection ve sistem güvenliği konularında derinlemesine teknik çözümler sunmuş, aynı zamanda veri kalitesi, algoritma ve platform güvenliği gibi eksikliklere de dikkat çekmiştir. Bu sayede DT'nin hem teorik hem de uygulamalı uygulamalarda yapı mühendisliğine sistematik, veri odaklı ve karar destekli yaklaşım getirdiği açıktır.

Yukarıdaki genel literatür özetinden de anlaşılacağı üzere dijital ikiz teknolojisi, mimarlık ve inşaat mühendisği sektöründe devrim niteliğinde bir değişimi temsil etmekte olup, akıllı binaların ve sürdürülebilir şehirlerin geleceğinin temelini oluşturmaktadır.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Bu çalışma, yapı sektörünün dijital dönüşümünde kritik bir rol oynayan dijital ikiz teknolojisinin kapsamlı bir analizini sunarak büyük önem taşımaktadır. Geleneksel yapı yönetimi ve işletme pratiklerinin karşılaştığı artan karmaşıklık, sürdürülebilirlik baskıları ve maliyet baskıları karşısında, bu çalışma dijital ikizlerin sunduğu yenilikçi ve entegre çözüm yaklaşımını ortaya koymaktadır. Dijital ikizler, tasarım aşamasından başlayarak bir yapının tüm yaşam döngüsü boyunca gerçek zamanlı veri akışı, ileri analitik yetenekler ve simülasyon modelleri aracılığıyla verimlilik, güvenlik ve sürdürülebilirlik alanlarında somut faydalar sağlamaktadır. Bu bağlamda çalışma, akademisyenler, sektör profesyonelleri, yatırımcılar ve politika yapıcılar için dijital ikizlerin potansiyelini anlamak ve bu teknolojinin benimsenmesi için gereken yol haritasını çıkarmak adına değerli bir kaynak işlevi görmektedir.

Dijital ikizlerin tam potansiyeline ulaşabilmesi için sektörün bir araya gelmesi ve ortak adımlar atması gerekmektedir. Özellikle veri entegrasyonu ve standardizasyonunun sağlanması, farklı platformlar ve yazılımlar arasında kesintisiz iletişimi kolaylaştıracaktır. Yüksek başlangıç maliyetlerini düşürmek ve yatırım getirisini (ROI) somutlaştırmak için daha fazla pilot proje ve vaka çalışmasına ihtiyaç vardır. Ayrıca, bu teknolojileri geliştirecek ve uygulayacak uzman insan kaynağının yetiştirilmesi adına eğitim ve öğretim programlarına yatırım yapılması kritik öneme sahiptir. Siber güvenlik risklerinin minimize edilmesi ve veri gizliliğinin korunması da dijital ikizlerin güvenilirliğini artırmak için üzerinde durulması gereken önemli konulardır.

Akademik çevreler, dijital ikizleri çok disiplinli bir araştırma alanı olarak görmekte, yapay zekâ, IoT, büyük veri ve siber-fiziksel sistemler gibi teknolojilerin entegrasyonunu ve potansiyelini derinlemesine incelemektedirler. Sektör liderleri ve büyük firmalar, dijital ikizleri rekabet avantajı sağlayan, verimlilik ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kilit bir stratejik araç olarak benimsemektedirler. Ancak küçük ve orta ölçekli işletmeler için maliyetler ve teknolojik adaptasyon süreci hala önemli birer engel teşkil etmektedir. Gelecekte, dijital ikizlerin inşaat sektöründeki yeri vazgeçilmez olacaktır. Sadece tekil binaların değil, şehirlerin ve hatta bölgelerin **"canlı"** dijital kopyaları haline gelerek, kaynak yönetiminden afet müdahalesine, kent planlamasından sürdürülebilirlik hedeflerine kadar her alanda akıllı ve öngörülü karar alma süreçlerinin temelini oluşturacaktır. Bu teknoloji, binaları daha akıllı, daha verimli, daha güvenli ve daha sürdürülebilir hale getirerek, yaşanabilir geleceğin inşa edilmesinde merkezi bir rol üstlenecektir.

Çalışma Vurguları (Highlights)

- **Gerçek Zamanlı Performans Optimizasyonu:** Dijital ikizler, binaların enerji tüketimini, yapısal bütünlüğünü ve çevresel koşullarını anlık olarak izleyerek, operasyonel verimliliği maksimize eder ve maliyetleri düşürür.
- **Proaktif Risk ve Bakım Yönetimi:** Sensör verileri ve yapay zekâ sayesinde potansiyel arızalar veya yapısal zayıflıklar önceden tespit edilir, böylece tahmine dayalı bakım ve proaktif güvenlik önlemleri uygulanır.
- **Tüm Yaşam Döngüsü Boyunca Değer Yaratımı:** Tasarımdan işletmeye kadar yapının her aşamasında bilgi akışı ve analiz sağlayarak, daha bilinçli karar alma süreçlerini destekler ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunur.

3. DİJİTAL İKİZLERİN TEMEL BİLEŞENLERİ (BASIC COMPONENTS OF DIGITAL TWINS)

Bir yapının dijital ikizi, tek bir yazılımdan veya teknolojiden ibaret değildir; aksine, farklı teknolojilerin ve disiplinlerin bir araya gelmesiyle oluşan karmaşık bir ekosistemdir [2]. Bu ekosistem, genellikle üç ana bileşen etrafında şekillenir. Bunlar **"fiziksel varlık"**, **"dijital model"** ve bu ikisi arasındaki sürekli veri akışını sağlayan **"bağlantı altyapısı"** dır [3]. Bu bileşenlerin uyumlu çalışması, dijital ikizin gerçek zamanlı performans analizi, simülasyon ve optimizasyon yeteneklerini mümkün kılar.

3.1. Fiziksel Varlık (Physical Presence)

Dijital ikizin en temel bileşeni, gerçek dünyada var olan, somut yapıdır. Bu, basit bir konuttan karmaşık bir ticari binaya, bir köprüden bir tünele veya geniş ölçekli bir altyapı projesine kadar her türlü inşa

edilmiş varlık olabilir [12]. Fiziksel varlık, dijital ikizin beslendiği **"veri kaynağı"**dır. Yapının boyutu, yaşı, kullanım amacı ve çevresel konumu gibi faktörler, dijital ikizin kapsamını ve karmaşıklığını belirler. Örneğin, bir akıllı bina, enerji yönetimi, iklim kontrolü ve güvenlik sistemleri gibi birçok entegre sisteme sahip olduğundan, dijital ikizi de bu sistemlerden gelen çok sayıda farklı veri türünü içerecektir [34]. Benzer şekilde, sismik aktiviteye maruz kalan bir köprü için oluşturulacak dijital ikiz, yapısal sağlık izleme sensörlerinden gelen titreşim ve gerinim verilerine ağırlık verecektir [10].

3.2. Dijital Model (Digital Model)

Dijital model, fiziksel varlığın sanal ve detaylı bir temsilidir. Bu model, sadece görsel bir kopyadan öte, yapının tüm teknik ve operasyonel bilgilerini barındırır.

3.2.1. Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ve Dijital İkiz İlişkisi (Building Information Modeling (BIM) and Digital Twin Relationship)

Dijital modelin temelini genellikle Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) oluşturur [50]. BIM, bir yapının tüm yaşam döngüsü boyunca gerekli olan geometrik, mekânsal, yapısal ve özellik tabanlı bilgileri içeren 3 boyutlu bir modelleme sürecidir [35]. Bir BIM modeli, kapı ve pencerelerin boyutlarından, duvarların malzemesine, mekanik ekipmanların teknik özelliklerine kadar çok detaylı verileri barındırabilir.

- **BIM'in Rolü:** Dijital ikiz oluşturma sürecinde BIM, yapının "DNA'sı" gibidir. Tasarım ve inşaat aşamasında oluşturulan BIM modeli, dijital ikiz için başlangıç veri setini sağlar [13]. Bu model, yapının bileşenleri, sistemleri ve bunların birbirleriyle olan ilişkileri hakkında statik bilgileri içerir.
- **BIM'den Dijital İkize Geçiş:** Dijital ikiz, bu statik BIM modelini alır ve üzerine gerçek zamanlı sensör verilerini ve operasyonel bilgileri ekleyerek onu dinamik ve **"canlı"** hale getirir [9]. Yani, BIM bir **"dijital prototip"** iken, dijital ikiz bu prototipin gerçek zamanlı, operasyonel bir versiyonudur [2]. Bu geçiş, yapının tasarımdan sonraki işletme ve bakım aşamalarında da dijital modelin güncel kalmasını sağlar.

3.2.2. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS/GIS) Entegrasyonu (Geographic Information Systems (GIS) Integration)

Dijital ikizler sadece yapının kendi içindeki verilerle sınırlı kalmaz; aynı zamanda yapının çevresel bağlamını da kapsayabilir. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS/GIS), yapının konumunu, çevresindeki arazi yapısını, topoğrafik özellikleri, ulaşım ağlarını, komşu yapıları ve hatta bölgesel iklim verilerini dijital ikize entegre etmeye olanak tanır [36]. Bu entegrasyon, özellikle büyük altyapı projeleri (havaalanları, limanlar) veya şehir ölçeğindeki dijital ikizler (Urban Digital Twins) için kritik öneme sahiptir. CBS/GIS verileri, yapının çevresel etkileşimlerini analiz etmeye (örneğin, rüzgâr akışları, güneşlenme potansiyeli), afet risk değerlendirmesi yapmaya ve bölgesel planlama kararlarını desteklemeye yardımcı olur.

3.2.3. Mühendislik Analiz Modelleri (Engineering Analysis Models)

Dijital ikizin sadece bir görsel veya bilgi modeli olmanın ötesinde, yapının performansını analiz etme ve gelecekteki davranışlarını tahmin etme yeteneği, çeşitli mühendislik analiz modellerinin entegrasyonuyla sağlanır. Bu modeller, dijital ikizin **"simülasyon motoru"** olarak işlev görür [12]. Bu konuda aşağıdaki hususlar örnek olarak gösterilebilir.

- **Yapısal Analiz Modelleri:** Sonlu elemanlar analizi (FEA) yazılımları (örneğin, SAP2000, ETABS), yapının yükler (deprem, rüzgâr, kar) altındaki tepkilerini, gerilme dağılımlarını ve deformasyonlarını simüle etmek için kullanılır. Gerçek zamanlı sensör verileri, bu modellerin kalibrasyonunu ve doğruluğunu artırır [10].
- **Enerji Simülasyon Modelleri:** Binaların enerji tüketimini (ısıtma, soğutma, aydınlatma) ve termal davranışlarını analiz etmek için IES VE, EnergyPlus gibi yazılımlar kullanılır. Bu modeller, farklı tasarım seçeneklerinin veya işletme senaryolarının enerji verimliliği üzerindeki etkilerini tahmin etmeye yardımcı olur [9].
- **Akışkanlar Dinamiği (CFD) Analizleri:** Hava akışı, duman yayılımı veya ısı transferi gibi konuları simüle etmek için kullanılır. Özellikle havalandırma sistemlerinin optimizasyonu veya yangın güvenliği senaryolarının incelenmesinde önemlidir.

3.3. Bağlantı ve Veri Akışı (IoT ve Ötesi) (Connectivity and Data Flow (IoT and Beyond))

Fiziksel varlık ile dijital model arasındaki köprü, sürekli ve gerçek zamanlı veri akışını sağlayan bağlantı altyapısıdır. Bu, genellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojileri aracılığıyla gerçekleşir.

3.3.1. Sensör Teknolojileri (Sensor Technologies)

Sensörler, fiziksel dünyadan dijital ikize veri taşıyan **"sinir uçları"** gibidir [1]. Çeşitli sensör türleri, yapının farklı performans parametrelerini izlemek için kullanılır:

- **Yapısal Sağlık İzleme Sensörleri:** İvmeölçerler (titreşim ve sismik tepki), gerinim ölçerler (malzeme deformasyonu), deplasman sensörleri (yer değiştirme), çatlak genişliği sensörleri (hasar tespiti) [10].
- **Enerji ve Çevresel Sensörler:** Akıllı elektrik, su ve gaz sayaçları, sıcaklık ve nem sensörleri, CO_2 ve uçucu organik bileşik (VOC) sensörleri (hava kalitesi), ışık sensörleri (gün ışığı ve aydınlatma), hava akışı sensörleri (HVAC performansı) [9].
- **Operasyonel ve Güvenlik Sensörleri:** Doluluk sensörleri (bina kullanımı ve insan trafiği), hareket sensörleri, CCTV kameralar, erişim kontrol sistemleri, yangın ve duman dedektörleri.

3.3.2. Nesnelerin İnterneti (IoT) Altyapısı (Internet of Things (IoT) Infrastructure)

IoT altyapısı, sensörlerden gelen verilerin toplanmasını, işlenmesini ve dijital ikiz platformuna iletilmesini sağlar.

- **IoT Cihazları ve Ağ Geçitleri:** Sensörlerden gelen ham verileri toplayan ve genellikle yerel olarak ön işleme tabi tutan cihazlardır. IoT ağ geçitleri (gateways), bu verileri daha geniş ağlara (bulut veya yerel sunucular) iletmekten sorumludur [37].
- **İletişim Protokolleri:** Sensör verileri, çeşitli kablolu veya kablosuz iletişim protokolleri aracılığıyla aktarılır. Bunlar arasında Wi-Fi, Ethernet, Bluetooth, LoRaWAN (uzun menzilli, düşük güçlü), Zigbee (düşük güçlü, kısa menzilli), NB-IoT (hücresel IoT) ve 5G gibi teknolojiler bulunur [38]. Protokol seçimi, veri hacmi, kapsama alanı, enerji tüketimi ve maliyet gibi faktörlere bağlıdır.
- **Bulut Bilişim ve Uç Bilişim (Edge Computing):** Toplanan büyük hacimli veriler, genellikle bulut tabanlı platformlarda depolanır, işlenir ve analiz edilir [39]. Bulut bilişim, ölçeklenebilirlik,

esneklik ve erişilebilirlik sunar. Ancak, anlık tepki gerektiren veya büyük veri hacimlerinin iletim maliyetini düşürmek için uç bilişim (edge computing) devreye girer. Uç bilişim, verilerin sensöre yakın bir noktada (cihazda veya ağ geçidinde) işlenmesini sağlayarak gecikmeyi azaltır ve bant genişliği kullanımını optimize eder.

3.3.3. Veri Yönetimi ve Entegrasyonu (Data Management and Integration)

Farklı kaynaklardan gelen heterojen veri setlerinin (BIM verileri, sensör verileri, bakım kayıtları, ERP/CMMS verileri vb.) toplanması, temizlenmesi, dönüştürülmesi ve entegre edilmesi dijital ikizin etkinliği için hayati önem taşır [40].

- **Büyük Veri (Big Data) Teknolojileri:** Dijital ikizler, genellikle yüksek hacimli, çeşitli ve hızla akan (3V: Volume, Variety, Velocity) veri kümeleriyle çalışır. Bu verilerin depolanması, işlenmesi ve analizi için Hadoop, Spark gibi büyük veri teknolojileri kullanılır.
- **Veritabanları:** İlişkisel (SQL) veya ilişkisel olmayan (NoSQL) veritabanları, sensör verilerinin zaman serisi verisi olarak depolanması ve diğer yapısal verilerle ilişkilendirilmesi için kullanılır.
- **API'ler (Uygulama Programlama Arayüzleri) ve Entegrasyon Katmanları:** Dijital ikiz platformu, farklı yazılımlar (BIM yazılımları, BMS – Bina Yönetim Sistemleri, CMMS – Bilgisayar Destekli Bakım Yönetim Sistemleri, ERP – Kurumsal Kaynak Planlaması) ve veri kaynakları arasında kesintisiz veri alışverişi sağlamak için standartlaştırılmış API'ler ve entegrasyon katmanları kullanır. Bu, veri silosunu ortadan kaldırarak kapsamlı bir görünüm sunar.

Bu temel bileşenlerin birbiriyle uyumlu ve entegre bir şekilde çalışması, bir yapının dijital ikizinin tam potansiyelini ortaya çıkarmasını sağlar.

4. ANALİZ, MODELLEME VE SİMÜLASYON MOTORLARI (ANALYSIS, MODELING, AND SIMULATION ENGINES)

Dijital ikizin sadece bir veri deposu veya görsel bir kopyası olmaktan çıkıp, akıllı ve öngörülü bir araç haline gelmesini sağlayan en kritik bileşenlerden biri, toplanan verileri işleyen, analiz eden ve gelecek senaryolarını simüle eden motorlardır. Bu bileşenler, dijital ikizin "**beyn**i" ve "**karar destek mekanizması**" olarak işlev görür, fiziksel varlığın davranışını anlamak, sorunları önceden tespit etmek ve performansı optimize etmek için değerli içgörüler sunar [2].

4.1. Veri Analizi Araçları (Data Analysis Tools)

Fiziksel yapıdan toplanan ham sensör verileri, anlamlı bilgilere dönüştürülmedikçe tek başına yeterli değildir. Veri analizi araçları, bu büyük ve sürekli akan veri setlerini işleyerek yapının performansı hakkında derinlemesine içgörüler sağlar.

- **Tanımlayıcı Analiz (Descriptive Analytics):** Bu analiz türü, geçmişte ne olduğunu açıklar. Örneğin, bir binanın belirli bir ayda ne kadar enerji tükettiğini, HVAC sisteminin çalışma sürelerini veya belirli bir odanın ortalama sıcaklığını gösterir. Gösterge tabloları (dashboards) ve raporlar aracılığıyla verilerin görselleştirilmesi, yöneticilerin anlık durumu kolayca anlamasına yardımcı olur [41].
- **Tanısal Analiz (Diagnostic Analytics):** Tanımlayıcı analizin bir adım ötesine geçerek, "**neden oldu?**" sorusuna cevap arar. Örneğin,

yüksek enerji tüketiminin nedeninin arızalı bir ısıtma sistemi mi, yoksa kötü yalıtım mı olduğunu belirlemek için veriler arasındaki ilişkileri inceler [42].

- **Anomali Tespiti (Anomaly Detection):** Sensör verilerindeki normalden sapmaları (anormallikleri) otomatik olarak belirlemek için kullanılır. Bu, bir ekipman arızası, beklenmedik bir enerji sızıntısı veya yapısal bir deformasyon gibi potansiyel sorunların erken aşamada tespit edilmesini sağlar. Makine öğrenimi algoritmaları, normal davranış kalıplarını öğrenerek bu anormallikleri hızla tanımlayabilir [43].

4.2. Yapay Zekâ (AI) ve Makine Öğrenimi (ML) Algoritmaları (Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) Algorithms)

Yapay zekâ ve özellikle makine öğrenimi, dijital ikizlerin analitik yeteneklerini önemli ölçüde artıran temel teknolojilerdir. Bu algoritmalar, büyük veri setlerindeki karmaşık kalıpları ve ilişkileri öğrenerek, insan gözüyle tespit edilemeyecek içgörüler sağlar.

- **Tahmine Dayalı Analiz (Predictive Analytics):** Geçmiş verileri ve mevcut koşulları kullanarak gelecekte ne olabileceğini tahmin eder. Örneğin, belirli bir ekipmanın ne zaman arızalanacağını tahmin edebilir (tahmine dayalı bakım), binanın gelecekteki enerji talebini öngörebilir veya bir deprem anında yapının göstereceği tepkiyi modelleyebilir [44]. Bu sayede, proaktif önlemler alınarak maliyetler düşürülebilir ve operasyonel verimlilik artırılabilir.
- **Reçeteli Analiz (Prescriptive Analytics):** Sadece ne olacağını tahmin etmekle kalmaz, aynı zamanda belirlenen hedeflere ulaşmak veya sorunları çözmek için "**ne yapılması gerektiğini**" de önerir. Örneğin, enerji tüketimini %10 azaltmak için hangi HVAC ayarlarının değiştirilmesi gerektiğini veya yapısal zayıflığı gidermek için hangi onarım yöntemlerinin uygulanması gerektiğini önerebilir [45].
- **Optimizasyon Algoritmaları:** Belirli kısıtlamalar altında en iyi çözümü bulmak için kullanılır. Örneğin, bina içindeki sıcaklık ve nemi en düşük enerji tüketimiyle optimum seviyede tutmak veya tahliye yollarını yangın durumunda en kısa ve güvenli hale getirmek gibi optimizasyon görevlerinde kullanılır.
- **Derin Öğrenme (Deep Learning):** Özellikle görsel verilerin (CCTV kamera görüntüleri) veya yapısal titreşim sinyallerinin analizinde etkilidir. Anormal davranışları veya yapısal kusurları otomatik olarak tespit etmek için kullanılabilir [46]. Derin öğrenme tabanlı modellerin dijital ikiz uygulamalarındaki başarısı, özellikle arıza teşhisi gibi görevlerde açıkça ortaya çıkmaktadır. Aydın ve Akın (2024) tarafından yapılan çalışmada, transfer öğrenmeye dayalı EfficientNetV2L ve InceptionResNetV2 modelleriyle %99.5'in üzerinde doğruluk oranlarına ulaşılmış ve bu modellerin endüstriyel motor arızalarının tespiti için güçlü bir çözüm sunduğu gösterilmiştir. Elde edilen bu başarı, dijital ikiz sistemlerinin arıza tespiti, tahmine dayalı analiz ve gerçek zamanlı izleme süreçlerinde derin öğrenmenin ne denli etkili olduğunu vurgulamaktadır [47].

4.3. Simülasyon Modelleri (Simulation Models)

Dijital ikizlerin en güçlü yeteneklerinden biri, fiziksel varlığa zarar vermeden veya maliyetli gerçek dünya deneyleri yapmadan çeşitli senaryoları sanal ortamda test edebilme yeteneğidir. Simülasyon modelleri, bu "**ne olurdu**?" senaryolarını keşfetmeye olanak tanır.

- **Enerji Simülasyonları:** Yapının termal davranışı, güneş kazancı, ısı kayıpları ve farklı HVAC sistemlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkileri simüle edilebilir. Örneğin, IES VE veya EnergyPlus gibi yazılımlar kullanılarak farklı yalıtım malzemelerinin veya pencere tiplerinin enerji verimliliğine etkisi değerlendirilebilir [48]. Bu, özellikle enerji verimliliği hedeflerine ulaşmak ve işletme maliyetlerini düşürmek için kritiktir.
- **Yapısal Simülasyonlar:** Yapının deprem, şiddetli rüzgâr veya aşırı kar yükü gibi dış etkenler altındaki tepkileri, sonlu elemanlar analizi (FEA) yazılımları (örneğin, SAP2000, ETABS, Abaqus) kullanılarak simüle edilebilir. Bu simülasyonlar, yapının kritik noktalarındaki gerilmeleri, deformasyonları ve potansiyel zayıflıkları ortaya koyar [10]. Gerçek zamanlı sensör verileriyle bu simülasyon modelleri kalibre edilerek doğrulukları artırılır.
- **Akışkanlar Dinamiği (CFD) Analizleri:** Bina içindeki hava akışı, ısı dağılımı, duman yayılımı veya hava kalitesi gibi konuları görselleştirmek ve analiz etmek için kullanılır [49]. Bu, özellikle havalandırma sistemlerinin etkinliğini optimize etmek, konfor koşullarını iyileştirmek ve yangın güvenliği senaryolarını test etmek için önemlidir.
- **Tahliye ve Yaya Akışı Simülasyonları:** Kalabalık alanlarda veya acil durum senaryolarında insanların nasıl hareket ettiğini simüle ederek, tahliye rotalarını optimize etmek ve sıkışıklık noktalarını belirlemek için kullanılır [50].

Bu analiz, modelleme ve simülasyon motorları, dijital ikizin sadece bir veri toplama aracı olmaktan öte, akıllı ve proaktif bir yönetim platformu haline gelmesini sağlar. Elde edilen içgörüler, yapının daha güvenli, daha verimli ve daha sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi için temel oluşturur.

5. DİJİTAL İKİZLERİN YAPILAR İÇİN FAYDALARI (BENEFITS OF DIGITAL TWINS FOR BUILDINGS)

Yapıların dijital ikizleri, projenin tüm yaşam döngüsü boyunca (tasarım, inşaat, işletme, bakım ve hatta yıkım) önemli faydalar sunarak, geleneksel yapı yönetim yaklaşımlarına kıyasla devrim niteliğinde iyileştirmeler sağlar [13]. Bu faydalar, maliyet tasarrufundan güvenlik artışına, verimlilikten sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmaya kadar geniş bir yelpazeyi kapsar.

5.1. Tasarım ve İnşaat Aşamasında Sağladığı Faydalar (Benefits in Design and Construction Phase)

Dijital ikizler, bir yapının henüz fiziksel olarak var olmadığı erken aşamalardan itibaren değerli katkılar sunar.

Daha Akıllı ve Performansa Dayalı Tasarım Kararları:

- **Simülasyonlarla Optimizasyon:** Tasarımcılar, farklı tasarım seçeneklerinin (malzeme seçimi, cephe tasarımı, mekânsal düzenleme) enerji performansı (ısıtma, soğutma, aydınlatma), gün ışığı alımı, akustik konfor ve yapısal bütünlük üzerindeki etkilerini dijital ikiz üzerinden sanal ortamda simüle edebilirler [9]. Örneğin, farklı pencere boyutları veya gölgeleme elemanlarının gün ışığına ve enerji tüketimine nasıl etki edeceğini önceden görmek, optimum tasarım çözümlerini belirlemeye yardımcı olur [49].
- **Performansa Dayalı Tasarım:** Hedeflenen performans kriterlerine (örneğin, belirli bir enerji sınıfı, belirli bir iç hava kalitesi standardı) ulaşmak için tasarımın iteratif olarak geliştirilmesini

sağlar. Bu, geleneksel deneme-yanılma yöntemlerine göre çok daha hızlı ve verimli bir süreç sunar.

Risk Yönetimi ve Çatışma Tespiti:

- **Çatışma Tespiti ve Azaltma:** Farklı mühendislik disiplinlerinden (mimari, statik, mekanik, elektrik, tesisat) gelen BIM modellerinin dijital ikiz ortamında bir araya getirilmesi, olası çakışmaların (örneğin, bir boru hattının kirişten geçmesi, havalandırma kanalının elektrik panosuyla kesişmesi) inşaat başlamadan önce otomatik olarak tespit edilmesini sağlar [51]. Bu, şantiyede oluşabilecek pahalı revizyonları, gecikmeleri ve yeniden işleme maliyetlerini önemli ölçüde azaltır.
- **Güvenlik Risklerinin Azaltılması:** İnşaat süreçlerinin sanal simülasyonu, potansiyel iş güvenliği risklerinin (örneğin, ekipman yerleşimi, malzeme kaldırma operasyonları) önceden belirlenmesine ve gerekli önlemlerin alınmasına olanak tanır [52].

Tedarik Zinciri Optimizasyonu:

- **Lojistik ve Malzeme Akışı Yönetimi:** Dijital ikiz, inşaat sürecinin lojistik adımlarını (malzeme teslimatları, depolama, montaj sırası) sanal olarak planlamaya ve optimize etmeye yardımcı olur [53]. Bu, malzeme israfını azaltır, teslimat sürelerini optimize eder ve şantiye verimliliğini artırır.
- **Bütçe ve Zaman Tasarrufu:** Hataların erken tespiti, iş-uygulama çatışmaların giderilmesi ve süreç optimizasyonu sayesinde, inşaat projelerinin bütçe ve zaman çizelgelerine uyum sağlaması kolaylaşır. Bu da projenin toplam maliyetini düşürür ve zamanında teslim edilmesini sağlar [11].

5.2. İşletme ve Bakım Aşamasında Sağladığı Faydalar (Yapının Yaşam Döngüsü Boyunca)(Benefits Provided During Operation and Maintenance Phase (Throughout the Life Cycle of the Building))

Yapıların işletme ve bakım aşaması, toplam yaşam döngüsü maliyetlerinin büyük bir kısmını oluşturur [9]. Dijital ikizler, bu aşamada sağladıkları sürekli izleme ve analitik yeteneklerle önemli optimizasyonlar sunar. Geleneksel bakım yaklaşımlarının ötesine geçen dijital ikiz sistemlerinin kestirimci bakım süreçlerinde sunduğu avantajlar, endüstriyel verimliliği doğrudan etkilemektedir. Aydın ve Akın'ın (2021) çalışmasında, dijital ikizlerin üretim sistemlerine entegrasyonu ile bakım zamanlamasının optimize edilebildiği, arıza oranlarının azaltıldığı ve üretim sürekliliğinin sağlandığı vurgulanmaktadır. Çalışmada, yapay zekâ ve veri temelli modelleme tekniklerinin dijital ikizlerle birleşerek Endüstri 4.0 tabanlı süreçlerde karar destek sistemlerine önemli katkılar sunduğu gösterilmiştir [54].

Gerçek Zamanlı Performans İzleme ve Yönetimi:

- **Kapsamlı Veri İzleme:** Yapının tüm kritik sistemlerinin (HVAC, aydınlatma, güvenlik, asansörler) ve çevresel koşulların (iç/dış sıcaklık, nem, hava kalitesi, CO_2 seviyeleri) anlık olarak izlenmesini sağlar [1]. Bu sürekli veri akışı, bina yöneticilerine yapının **"canlı"** bir görünümünü sunar.
- **Enerji Yönetimi ve Optimizasyonu:** Akıllı sayaçlardan ve sensörlerden gelen verilerle enerji tüketimi detaylı olarak analiz edilir. Dijital ikiz, yapay zekâ destekli algoritmalarla verimsizlikleri tespit eder ve ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma sistemlerinin otomatik olarak optimize edilmesini

önerir veya gerçekleştirir [9]. Bu da enerji israfını önler ve işletme maliyetlerini önemli ölçüde düşürür.

Tahmine Dayalı Bakım (Predictive Maintenance):

- **Arıza Öncesi Tespit:** Sensör verileri ve makine öğrenimi algoritmaları sayesinde, ekipmanların (örneğin, HVAC motorları, pompalar, asansör mekanizmaları) potansiyel arızaları, henüz meydana gelmeden önce tahmin edilebilir [44]. Anormal titreşimler, sıcaklık artışları veya performans düşüşleri gibi göstergeler, dijital ikiz tarafından analiz edilir ve uyarılar tetiklenir.
- **Plansız Kesintilerin Azaltılması:** Bu proaktif yaklaşım, plansız arızaları, operasyonel kesintileri ve acil durum onarım maliyetlerini minimize eder. Bakım faaliyetleri, ihtiyaç duyulduğu anda veya öncesinde planlanarak kaynakların daha verimli kullanılması sağlanır.

Kullanıcı Deneyimi ve Konfor Yönetimi:

- **İç Ortam Optimizasyonu:** İç hava kalitesi (CO_2, VOC), sıcaklık, nem ve aydınlatma gibi parametreler sürekli izlenerek, bina sakinlerinin konfor seviyesi maksimize edilir [52]. Dijital ikiz, kullanıcı geri bildirimlerini de entegre ederek ortamı otomatik olarak ayarlayabilir.
- **Alan Yönetimi ve Optimizasyonu:** Doluluk sensörleri ve yaya akışı verileri kullanılarak, binadaki alanların (ofisler, toplantı odaları, ortak alanlar) kullanım yoğunluğu izlenir. Bu bilgiler, alan kullanımını optimize etmek, verimsiz alanları belirlemek ve gelecekteki yeniden düzenlemeler için kararlar almak için kullanılabilir [13].

Güvenlik ve Acil Durum Yönetimi:

- **Gerçek Zamanlı Durum Farkındalığı:** Yangın, deprem veya diğer acil durumlarda, dijital ikiz, yapının anlık durumunu (hasar durumu, duman yayılımı, insan konumu) gerçek zamanlı olarak gösterir [10].
- **Tahliye Planı Optimizasyonu:** Tahliye rotaları, en az kalabalık ve en güvenli yollar baz alınarak dinamik olarak güncellenebilir ve bina sakinlerine rehberlik edilebilir [50]. Acil durum ekipleri, dijital ikizden alınan bilgilerle olay yerine daha hızlı ve etkin müdahale edebilir.

Daha Uzun Yapı Ömrü ve Değer Artışı:

- **Proaktif Bakım ve Onarım:** Yapısal zayıflıkların veya hasarların erken teşhisi ve proaktif bakımı sayesinde yapının fiziksel ömrü uzar. Bu da binanın amortisman süresini uzatır ve zamanla değerini korumasına yardımcı olur [11].
- **Yenileme ve Dönüşüm Kararları:** Yapının mevcut durumu ve performans verileri, gelecekteki yenileme, genişletme veya dönüşüm projeleri için veri odaklı kararlar alınmasına olanak tanır.

5.3. Sürdürülebilirlik Katkısı (Sustainability Contribution)

Dijital ikizler, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kilit bir rol oynar.

- **Karbon Ayak İzinin Azaltılması:** Enerji ve su tüketiminin optimize edilmesi, atık yönetiminin iyileştirilmesi ve kaynak kullanımının verimli hale getirilmesiyle binaların karbon ayak izi önemli ölçüde azalır [9].
- **Çevresel Performans İzleme:** Hava kalitesi, su tüketimi ve atık üretimi gibi çevresel performans göstergelerinin sürekli

izlenmesi, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma yolunda ilerlemenin takip edilmesini ve iyileştirme alanlarının belirlenmesini sağlar.

Dijital ikizler, yapıların sadece fiziksel varlıklar olmaktan çıkıp, akıllı, duyarlı ve sürekli kendini optimize eden sistemler haline gelmesini sağlayarak, inşaat ve emlak sektöründe operasyonel mükemmeliyeti ve sürdürülebilirliği desteklemektedir.

6. DİJİTAL İKİZ OLUŞTURMA ADIMLARINI DETAYLANDIRMA (DETAILING THE STEPS TO CREATE A DIGITAL TWIN)

Bir yapının dijital ikizini oluşturmak, birden fazla teknoloji ve disiplinin entegrasyonunu gerektiren kapsamlı bir süreçtir. Bu süreç, genellikle aşamalı bir yaklaşımla ilerler ve projenin ölçeğine, karmaşıklığına ve belirlenen hedeflere göre uyarlanabilir [13]. Başarılı bir dijital ikiz uygulaması için sistematik bir planlama ve uygulama hayati öneme sahiptir.

Özetle, dijital ikiz teknolojisinin yapı sektöründe uygulanması, yapıların tüm yaşam döngüsü boyunca daha akıllı, güvenli ve verimli bir şekilde yönetilmesini sağlar. Bu sürecin temel adımları şu şekilde gelişir: İlk aşamada proje kapsamı belirlenir ve dijital ikizin hangi aşamalarda (tasarım, yapım, işletme, bakım) kullanılacağı netleştirilir. Dijital ikizin uygulamalarının temel göstergeleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Daha sonra, mevcut yapılar için LiDAR tarama, 3D lazer tarama, fotogrametri ve BIM verileri toplanarak temel dijital model oluşturulur. Yeni yapılar için ise dijital ikiz, BIM tabanlı tasarım süreciyle doğrudan entegre edilir. Bunu takiben, yapının performansını gerçek zamanlı izleyecek IoT sensörleri ve kablosuz iletişim altyapısı kurulur. Toplanan veriler güvenilir veri altyapısında işlenir ve dijital model üzerinde sürekli güncellemeler yapılır. Mühendislik ekipleri bu verileri kullanarak yapının farklı senaryolar altındaki davranışını simüle eder, tasarım optimizasyonları gerçekleştirir ve proaktif bakım planları oluşturur. Başarıyla uygulanan dijital ikizler, yapıların gerçek zamanlı performans takibini, öngörücü bakımını, karbon ayak izinin azaltılmasını ve afet dayanıklılığının artırılmasını mümkün kılarak yapı sektöründe önemli katma değer yaratmaktadır.

Yapıların dijital ikiz ile modellenmesi veya tasarlanması günümüzde mimarlık ve inşaat mühendisliği sektörü için önemli bir yenilikçi süreçtir. Dijital ikiz yol haritası kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **Planlama ve İhtiyaç Analizi:**
  - Projenin kapsamı, hedefleri ve beklentileri belirlenir
  - Dijital ikizin hangi aşamalarda (tasarım, yapım, işletme, bakım) ve hangi detay seviyesinde (LOD - Level of Detail) kullanılacağı tanımlanır.
  - İlgili paydaşlar (mimar, mühendis, işletme yöneticileri, yazılım uzmanları) belirlenir.
- **Veri Toplama ve Modelleme**
  - Mevcut yapılar için: LiDAR tarama, 3D lazer tarama, fotogrametri, BIM (Building Information Modeling) veri entegrasyonu kullanılır.
  - Yeni yapılar için: BIM tabanlı tasarım süreçlerinde dijital ikiz planlamaya entegre edilir.
  - Sensörlerin (ivmeölçerler, sıcaklık, nem, yük hücreleri vb.) konumları ve tipleri belirlenir.
- **Sensör ve IoT Altyapısı Kurulumu**
  - Gerçek zamanlı veri toplayacak IoT cihazları ve sensör ağları kurulur.

- Veri iletişimi için güvenilir kablosuz veya kablolu altyapı sağlanır.

- **Veri Entegrasyonu ve Model Güncelleme**
  - Toplanan sensör verileri sürekli olarak dijital modele entegre edilir.
  - Modelin kendini sürekli güncelleyen **"yaşayan bir model"** hâline gelmesi sağlanır.
- **Simülasyon ve Optimizasyon**
  - Dijital ikiz üzerinde farklı yükleme ve kullanım senaryoları simüle edilir (deprem, rüzgâr, yorgunluk vb.).
  - Enerji kullanımı, bakım ihtiyacı, kullanıcı konforu gibi parametreler optimize edilir.
- **Bakım ve Yönetim**
  - Dijital ikiz yapı ömrü boyunca güncel tutulur.
  - Proaktif bakım planları hazırlanır.
  - Yapısal sağlık izleme (SHM), performans yönetimi ve afet anında destek amaçlı kullanılır.

Tablo 1. Dijital İkizin Uygulamalarının Temel Göstergeleri
(Table 1. Key Indicators of Digital Twin Applications)

Yol Haritası	Gereksinimler	Proje Süresi	Faydaları
Hedef belirleme, kapsam analizi	BIM yazılımı (Revit, ArchiCAD, Tekla Structures vb.)	Küçük yapı: 3-6 ay	%20-30 bakım maliyet tasarrufu
Mevcut veri toplama (LiDAR, BIM, 3D tarama)	Sensörler ve IoT cihazları	Ticari bina: 6-12 ay	%10-25 enerji verimliliği artışı
IoT ve sensör altyapısı kurulumu	Veri toplama ve analiz yazılımı (SCADA sistemleri, özel IoT platformları)	Karmaşık altyapı: 12-24 ay+	Afet sonrası hızlı hasar tespiti
Veri entegrasyonu ve dijital model oluşturma	Bulut tabanlı veri altyapısı (AWS, Azure, Google Cloud)	Süre; veri toplama süreci, sensör yerleştirme kapsamı ve model detayı (LOD) ile doğrudan bağlantılıdır.	Yaşam döngüsü optimizasyonu
Simülasyon ve optimizasyon çalışmaları	Yapay zekâ ve makine öğrenimi entegrasyonu (isteğe bağlı)		Karbon ayak izi azaltımı
Sürekli bakım ve güncelleme	Siber güvenlik altyapısı		

6.1. Temel Verilerin Toplanması ve Modelleme (Basic Data Collection and Modeling)

Dijital ikizin sanal omurgasını oluşturan bu ilk adım, fiziksel varlığın detaylı bir dijital temsilinin oluşturulmasını içerir.

- **Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) Oluşturma:**
  - **Yeni Yapılar İçin:** Tasarım aşamasında, mimarlar, mühendisler ve diğer paydaşlar, BIM yazılımları (örneğin, Autodesk Revit, Graphisoft ArchiCAD, Tekla Structures) kullanarak yapının 3 boyutlu modelini oluşturur [51]. Bu model, sadece geometrik bilgileri (boyutlar, şekiller) değil, aynı zamanda yapının bileşenleri (duvarlar, kapılar, pencereler, kolonlar), malzemeleri (beton, çelik, cam), sistemleri (HVAC, elektrik, sıhhi tesisat) ve ilgili özellikleri (üretici bilgisi, performans verileri, kurulum tarihleri) gibi zengin verileri içerir. Bu bilgiler, dijital ikizin yaşam döngüsü boyunca kullanılacak temel veri setini oluşturur.
  - **Mevcut Yapılar İçin:** Halihazırda var olan binalar için dijital ikiz oluşturulacaksa, yapının mevcut durumunu dijital ortama

aktarmak için çeşitli teknolojiler kullanılır. Bu teknolojiler arasında lazer tarama (LiDAR), yapının yüksek hassasiyetli bir nokta bulutu oluşturmasını sağlar [55]. Fotogrametri (drone veya kamera ile çekilen görüntülerden 3D model oluşturma) de yaygın olarak kullanılır [56]. Elde edilen nokta bulutları veya görüntüler, daha sonra BIM yazılımlarına aktarılarak detaylı 3D BIM modellerine dönüştürülür. Bu süreç, "as-built" (inşa edildiği gibi) durumu doğru bir şekilde yansıtan bir dijital modelin elde edilmesini sağlar.

- **Veri Standartları ve Ortak Veri Ortamı (CDE):** Farklı disiplinlerden gelen ve farklı formatlarda olabilen (CAD çizimleri, spesifikasyonlar, proje yönetim dokümanları) verilerin tutarlı bir şekilde yönetilmesi ve paylaşılması için uluslararası standartlar (örneğin, ISO 19650) ve bir Ortak Veri Ortamı (Common Data Environment - CDE) kullanımı kritik öneme sahiptir [57]. CDE, tüm proje bilgilerini tek bir merkezi platformda birleştirerek veri bütünlüğünü ve işbirliğini kolaylaştırır.

- **Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS/GIS) Entegrasyonu:** Yapının sadece kendi içindeki verileri değil, aynı zamanda çevresel bağlamı da dijital ikize entegre edilmelidir. CBS/GIS verileri, yapının coğrafi konumunu, arazi topoğrafyasını, çevresel faktörleri (güneşlenme, rüzgâr yönü), ulaşım ağlarını ve komşu yapıları içerir [36]. Bu entegrasyon, özellikle yapının çevresel performansını değerlendirmek, afet risklerini analiz etmek (örneğin, sel riski), şehir planlama senaryolarını test etmek ve sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemek için hayati öneme sahiptir.

6.2. Sensör ve IoT Altyapısının Kurulması (Establishing Sensor and IoT Infrastructure)

Fiziksel varlıktan gerçek zamanlı veri akışını sağlamak, dijital ikizin dinamik yapısının temelini oluşturur. Bu adım, uygun sensörlerin seçimi, yerleşimi ve güvenilir bir iletişim ağının kurulmasını içerir [1].

- **Sensör Seçimi ve Yerleşimi:** Dijital ikizin amaçlarına ve izlenecek parametrelere göre doğru sensörler seçilir ve yapının stratejik noktalarına yerleştirilir. Örneğin:
  - **Yapısal Sağlık İzleme için:** İvmeölçerler (deprem veya rüzgâr yükü altındaki titreşimleri ölçmek için), gerinim ölçerler (malzemelerdeki deformasyonları tespit etmek için), deplasman sensörleri (yapının yer değiştirmesini izlemek için) ve akustik emisyon sensörleri (çatlak gelişimi gibi mikro-hasarları tespit etmek için) kullanılır [10].
  - **Enerji Performansı ve Çevresel Koşullar için:** Akıllı elektrik, su ve gaz sayaçları, bina içinde ve dışında sıcaklık/nem sensörleri, CO_2, VOC (Uçucu Organik Bileşikler) ve partikül madde sensörleri (iç hava kalitesi için), ışık sensörleri ve hava akışı sensörleri (HVAC sistem performansı için) yerleştirilir [9].
  - **Operasyonel ve Güvenlik İzleme için:** Doluluk sensörleri (bina kullanımını ve insan akışını izlemek için), hareket sensörleri, CCTV kameralar ve erişim kontrol sistemleri gibi sensörler konumlandırılabilir.
- **Sensör Ağ Tasarımı:** Sensörlerin sayısı, veri toplama sıklığı, güç kaynakları (pil ömrü, enerji hasadı) ve maliyet gibi faktörler göz önünde bulundurularak optimize edilmiş bir sensör ağı tasarlanır.

- **Ağ Altyapısı (IoT Gateway ve İletişim Protokolleri):** Sensörlerden gelen verileri toplayan, işleyen ve merkezi dijital ikiz platformuna ileten bir ağ altyapısı kurulur.
- **IoT Ağ Geçitleri (Gateways):** Bu cihazlar, sensörlerden gelen ham verileri toplar, ön işleme tabi tutar (filtreleme, birleştirme) ve daha geniş ağlara (bulut veya yerel sunucular) güvenli bir şekilde iletir [37].
- **İletişim Protokolleri:** Sensör verileri, çeşitli kablolu veya kablosuz iletişim protokolleri aracılığıyla aktarılır. Kablosuz teknolojiler arasında Wi-Fi, LoRaWAN (uzun menzilli, düşük güç tüketimli IoT uygulamaları için ideal), Zigbee (kısa menzilli, düşük güç tüketimli mesh ağları için), NB-IoT (hücresel IoT standardı) ve 5G (yüksek bant genişliği ve düşük gecikme süresi sunan) bulunur [38]. Protokol seçimi, veri hacmi, iletim mesafesi, enerji gereksinimleri ve siber güvenlik riskleri göz önünde bulundurularak yapılır.

6.3. Veri Toplama, Entegrasyon ve Depolama (Data Collection, Integration, and Storage)

Dijital ikizin dinamik ve güncel kalabilmesi için toplanan büyük hacimli verilerin etkin bir şekilde yönetilmesi gerekir.

- **Veri Akış Mekanizması:** Sensörlerden gelen veriler, belirlenen iletişim protokolleri ve IoT ağ geçitleri aracılığıyla sürekli olarak bir veri toplama platformuna akar. Bu platformlar, veri akışını yönetir ve verilerin doğru formatta alınmasını sağlar.
- **Veritabanı Oluşturma:** Büyük hacimli, sürekli akan ve farklı tiplerdeki sensör verilerini depolayacak ölçeklenebilir veritabanı sistemleri kurulur. Zaman serisi veritabanları (örneğin, InfluxDB, TimescaleDB) sensör verilerini etkin bir şekilde depolamak için idealdir. Ayrıca, yapısal verileri ve ilişkisel bilgileri depolamak için geleneksel ilişkisel veritabanları (SQL) veya esnek NoSQL veritabanları (örneğin, MongoDB, Cassandra) kullanılabilir. Bu veritabanları, geçmiş verilerin analizi, gelecekteki performans tahminleri ve trend belirleme için temel oluşturur.
- **Veri Entegrasyonu Platformu:** Dijital ikizin kalbi, farklı kaynaklardan (BIM modeli, sensör verileri, CBS verileri, işletme verileri, bakım kayıtları, hava durumu verileri, enerji faturaları vb.) gelen heterojen verileri bir araya getiren, senkronize eden ve anlamlı ilişkiler kuran bir entegrasyon platformudur [40]. Bu platformlar genellikle bulut tabanlı IoT platformları (örneğin, AWS IoT, Microsoft Azure IoT Hub, Google Cloud IoT Core) veya özel olarak geliştirilmiş kurumsal çözümler olabilir. API'ler (Uygulama Programlama Arayüzleri), farklı sistemler (Bina Yönetim Sistemleri - BMS, Kurumsal Kaynak Planlaması - ERP, Bilgisayar Destekli Bakım Yönetim Sistemleri - CMMS) arasında kesintisiz veri alışverişi için kritik öneme sahiptir. Bu entegrasyon, veri silolarını ortadan kaldırarak yapının bütüncül bir görünümünü sağlar.
- **Bulut Bilişim ve Uç Bilişim (Edge Computing):** Toplanan büyük verilerin işlenmesi ve depolanması için bulut bilişim esneklik, ölçeklenebilirlik ve erişilebilirlik sunar [39]. Ancak, gerçek zamanlı analiz gerektiren veya ağ gecikmesini minimize etmek gereken durumlarda uç bilişim devreye girer. Uç bilişim, verilerin sensöre yakın bir noktada (IoT ağ geçidinde veya yerel bir sunucuda) işlenmesini sağlayarak gecikmeyi azaltır, bant genişliği kullanımını optimize eder ve veri güvenliğini artırır.

Bu adımlar, dijital ikizin güvenilir ve kapsamlı bir veri tabanına sahip olmasını sağlayarak, sonraki analiz, modelleme ve simülasyon süreçleri için sağlam bir temel oluşturur.

7. ZORLUKLAR VE GELECEK PERSPEKTİFİ (CHALLENGES AND FUTURE PERSPECTIVE)

Yapıların dijital ikizleri, vaat ettiği büyük faydalara rağmen, uygulama süreçlerinde çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Ancak bu zorlukların üstesinden gelinmesiyle birlikte, teknolojinin gelecekte yapı sektörünü kökten değiştirecek bir potansiyel taşıdığı açıktır.

7.1. Karşılaşılan Zorluklar ve Engeller (Challenges and Obstacles Encountered)

Dijital ikizlerin geniş çaplı benimsenmesi ve etkin bir şekilde uygulanması, birtakım teknik, finansal ve organizasyonel engelleri aşmayı gerektirir:

- **Veri Entegrasyonu ve Standardizasyon:** Dijital ikizler, farklı kaynaklardan (BIM modelleri, sensör verileri, işletme sistemleri, dışsal veri akışları) gelen büyük hacimli ve heterojen verileri bir araya getirir. Bu verilerin farklı formatlarda, protokollerde ve kalite seviyelerinde olması, tutarlı ve sorunsuz bir entegrasyonu zorlaştırmaktadır [13]. Veri kalitesi, tutarlılığı ve standartlaştırılması, dijital ikizin güvenilirliği için kritik öneme sahiptir. Henüz tüm sektörde kabul görmüş evrensel veri standartlarının eksikliği, bu entegrasyonu karmaşık hale getirmektedir [58].
- **Yüksek Başlangıç Maliyeti ve ROI Gösterimi:** Sensör altyapısının kurulması, gelişmiş yazılım lisansları, veri depolama ve işleme kapasiteleri, siber güvenlik önlemleri ve nitelikli personel istihdamı, dijital ikiz projeleri için yüksek başlangıç maliyetleri oluşturabilir [20]. Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler için bu maliyetler caydırıcı olabilir. Yatırımın uzun vadeli faydalarını (işletme maliyeti tasarrufu, verimlilik artışı, risk azalması) somut olarak göstermek ve yatırım getirisini (ROI) netleştirmek, projelerin onaylanması için önemlidir.
- **Uzman İnsan Kaynağı İhtiyacı:** Dijital ikiz teknolojisi, hem inşaat ve mühendislik bilgisine hem de IoT, yapay zekâ, büyük veri analizi gibi ileri teknoloji becerilerine sahip multidisipliner ekipler gerektirir [4]. Sektörde bu entegre bilgi birikimine sahip kalifiye personel bulmak ve yetiştirmek önemli bir zorluktur.
- **Veri Güvenliği ve Gizliliği Endişeleri:** Dijital ikizler, binaların operasyonel performansından, kullanıcı hareketliliğine kadar hassas verileri toplar ve işler. Bu verilerin siber saldırılara, yetkisiz erişime veya kötüye kullanıma karşı korunması hayati önem taşır [59]. Veri gizliliği düzenlemelerine (örneğin, GDPR) uyum sağlamak ve güçlü siber güvenlik protokolleri oluşturmak, dijital ikizlerin yaygınlaşması için temel bir gerekliliktir.
- **Organizasyonel Değişim Yönetimi:** Dijital ikizlerin uygulanması, sadece teknolojik bir değişiklik değil, aynı zamanda iş süreçlerinde ve organizasyonel yapıda da önemli bir dönüşümü gerektirir. Geleneksel çalışma alışkanlıklarının değişmesi, yeni rollerin tanımlanması ve farklı departmanlar arasında işbirliğinin artırılması, dirençle karşılaşabilir [9]. Etkin bir değişim yönetimi stratejisi, bu engellerin aşılmasında kritik rol oynar.

7.2. Gelecek Trendleri ve Potansiyel Uygulamalar (Future Trends and Potential Applications)

Yukarıda belirtilen zorluklara rağmen, dijital ikiz teknolojisi hızla gelişmeye ve yeni uygulama alanları bulmaya devam etmektedir. Gelecekteki trendler, bu teknolojinin yapı sektöründeki ve ötesindeki etkisini daha da derinleştirecektir:

- **Şehir Ölçeğinde Dijital İkizler:** Tekil binaların ötesine geçerek, tüm şehirlerin veya büyük bölgelerin dijital ikizleri oluşturulmaya başlanmıştır [13]. Bu **"Akıllı Şehir İkizleri"**, trafik akışı optimizasyonu, enerji şebekesi yönetimi, atık yönetimi, afet müdahalesi planlaması ve vatandaş hizmetlerinin iyileştirilmesi gibi karmaşık şehir yönetimi sorunları için kapsamlı çözümler sunacaktır [36]. Özellikle üretim sistemleri ve mekanik bileşenlere yönelik dijital ikiz uygulamalarında, yalnızca arıza teşhisiyle sınırlı kalınmamalı; aynı zamanda sistemlerin zamanla maruz kalabileceği yapısal deformasyonlar da göz önünde bulundurulmalıdır. Aydın ve Akın (2021) tarafından yapılan çalışmada, dijital ikiz teknolojisinin kestirimci bakım ve üretim optimizasyonu süreçlerinde etkili bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiş ve bu bağlamda yapay zekâ destekli modelleme yaklaşımlarının sektör genelinde yaygınlaşması önerilmiştir. Bu tür yaklaşımlar, yapı sektörüne özgü dijital ikiz senaryolarına da adapte edilerek, zamana bağlı yapısal hasarların erken dönemde öngörülmesini sağlayabilir [54].
- **Blockchain Entegrasyonu:** Dijital ikizler, şeffaflık, güvenilirlik ve veri bütünlüğü sağlamak için blockchain teknolojisiyle entegre olabilir [60]. Bu, özellikle tedarik zinciri yönetimi, akıllı sözleşmeler ve mülkiyet kayıtlarının güvenli bir şekilde yönetilmesi gibi alanlarda potansiyel sunar.
- **Otonom Sistemler ve Robotik ile Entegrasyon:** Dijital ikizden elde edilen gerçek zamanlı veriler ve analizler, otonom robotların (örneğin, şantiyede denetim yapan dronlar, bina içinde temizlik veya güvenlik görevlerini üstlenen robotlar) daha akıllıca hareket etmesini ve görevlerini optimize etmesini sağlayacaktır [52]. Örneğin, dijital ikiz, bir robotun bakım için hangi ekipmana gitmesi gerektiğini veya bir güvenlik devriyesinin hangi rotayı izlemesi gerektiğini belirleyebilir.
- **Artırılmış Gerçeklik (AR) ve Sanal Gerçeklik (VR) Entegrasyonu:** Dijital ikiz verilerinin AR/VR ortamlarıyla birleştirilmesi, kullanıcılara fiziksel yapıyla daha sürükleyici ve etkileşimli bir deneyim sunar [9]. Bakım personeli, bir AR gözlüğü kullanarak fiziksel ekipmanın üzerine dijital ikizden gelen performans verilerini, bakım geçmişini veya talimatları yansıtabilir.
- **Sıfır Enerjili Binalar ve Net Sıfır Emisyon Hedefleri:** Dijital ikizler, binaların enerji ve çevresel performansını sürekli izleyerek, sıfır enerjili veya hatta enerji üreten (net pozitif) binaların tasarımını, inşasını ve işletmesini destekleyecektir. Bu, küresel iklim değişikliği hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynayacaktır [11].

8. ÖRNEK UYGULAMALAR (VAKA ÇALIŞMALARI) (SAMPLE APPLICATIONS (CASE STUDIES))

Dijital ikiz teknolojisi, dünya genelinde çeşitli ölçeklerde ve sektörlerde somut uygulamalarla kendini kanıtlamaktadır. İşte mimarlık ve inşaat sektöründen bazı öne çıkan örnekler:

- **Singapur Akıllı Şehir Dijital İkizi:** Singapur, ulusal düzeyde bir dijital ikiz oluşturma konusunda öncü bir ülkedir. **"Virtual Singapore"** adlı proje, tüm şehrin 3D modelini gerçek zamanlı sensör verileriyle birleştirerek, şehir planlaması, afet yönetimi, trafik simülasyonları ve vatandaş hizmetlerinin geliştirilmesi için kullanılmaktadır [61]. Bu ikiz, şehirdeki enerji tüketimini optimize etme, hava kalitesini izleme ve gelecekteki gelişim senaryolarını test etme gibi geniş kapsamlı uygulamalara olanak tanır.

- **Helsinki "Kalp Atışı" Dijital İkizi:** Finlandiya'nın Helsinki şehri, şehir modellerini gerçek zamanlı trafik, hava durumu ve kamu hizmetleri verileriyle entegre ederek kendi dijital ikizini geliştirmektedir. Bu proje, şehirdeki karbondioksit emisyonlarını azaltmayı, enerji verimliliğini artırmayı ve vatandaş katılımını güçlendirmeyi hedeflemektedir [62].
- **One Za'abeel Kulesi, Dubai:** Dubai'deki One Za'abeel karma kullanımlı projesi, inşaat ve işletme süreçlerinde dijital ikiz teknolojilerini kullanmaktadır. Projenin BIM modeli, inşaat sürecinde ilerlemeyi takip etmek, çatışmaları çözmek ve malzeme akışını yönetmek için kullanılmıştır. Tamamlandığında, binanın işletme ve bakım süreçleri, dijital ikiz üzerinden gerçek zamanlı enerji yönetimi, ekipman performansı izleme ve tahmine dayalı bakım ile optimize edilecektir [63].
- **Crossrail (Elizabeth Line), Londra:** Avrupa'nın en büyük altyapı projelerinden biri olan Londra'daki Crossrail (şimdiki adıyla Elizabeth Line), projenin yaşam döngüsü boyunca devasa bir dijital bilgi modeli oluşturarak dijital ikiz prensiplerini uygulamıştır. Bu model, tasarım, inşaat ve nihayetinde operasyonel bakım için bir bilgi kaynağı olarak hizmet vermekte, trenlerin ve tünellerin gerçek zamanlı performans verileriyle sürekli güncellenmektedir [64]. Bu sayede arıza süreleri azaltılmakta ve yolcu deneyimi iyileştirilmektedir.
- **Akıllı Kampüsler:** Üniversite kampüsleri gibi büyük ve karmaşık yapılar topluluğu, dijital ikizler için ideal uygulama alanlarıdır. Örneğin, Tsinghua Üniversitesi, kampüsündeki binaların enerji tüketimini, doluluk oranlarını ve çevresel koşullarını izlemek için bir dijital ikiz platformu kullanmaktadır. Bu sayede, kampüs genelinde enerji verimliliği artırılmakta, tesis yönetimi optimize edilmekte ve öğrenci/personel konforu iyileştirilmektedir [65].

Bu örnekler, dijital ikizlerin inşaat sektöründe sadece teorik bir konsept olmaktan çıkıp, somut ve ölçülebilir faydalar sağlayan pratik bir çözüm haline geldiğini göstermektedir. Gelecekte, bu teknolojinin daha da yaygınlaşması ve standartlaşmasıyla, yapıların tasarımı, inşası ve işletmesinde köklü değişiklikler yaşanması beklenmektedir.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışma, yapıların dijital ikizlerinin modern inşaat ve tesis yönetimi paradigmasındaki dönüştürücü rolünü detaylı bir şekilde incelemiştir. Dijital ikizler, fiziksel varlıkların gerçek zamanlı ve dinamik sanal temsilleri olarak, tasarım, inşaat, işletme ve bakım süreçlerinde eşsiz faydalar sunmaktadır. Kapsamlı analizler, dijital ikizlerin sadece operasyonel verimliliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda güvenlik, sürdürülebilirlik ve bilinçli karar alma yeteneklerini de önemli ölçüde geliştirdiğini ortaya koymuştur.

9.1. Temel Çıkarımlar ve Değerlendirme (Key Takeaways and Evaluation)

Çalışma boyunca ele alınan konular ışığında, dijital ikizlerin yapı sektörü için sunduğu temel değer teklifi aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **Veri Odaklı Karar Alma:** Dijital ikizler, büyük hacimli ve heterojen verileri (BIM, sensör, GIS vb.) entegre ederek, geçmiş performansın analizi, mevcut durumun izlenmesi ve gelecekteki davranışların tahmini için güçlü bir temel sunar. Bu, geleneksel, sezgisel karar alma süreçlerinden, kanıta dayalı, proaktif yaklaşımlara geçişi sağlar [45].

- **Yaşam Döngüsü Boyunca Değer Yaratımı:** Tasarım aşamasında çatışma tespiti ve simülasyonlarla hataları azaltırken, işletme aşamasında enerji verimliliği ve tahmine dayalı bakım ile maliyet tasarrufu sağlar [9]. Bu sürekli değer akışı, yapının toplam yaşam döngüsü maliyetini optimize eder ve varlık değerini artırır.
- **Risk ve Güvenlik Yönetimi:** Yapısal sağlık izleme ve acil durum senaryolarının simülasyonu sayesinde, potansiyel riskler erken aşamada tespit edilebilir, can güvenliği artırılır ve afetlere karşı dayanıklılık geliştirilir [10].
- **Sürdürülebilirlik Katkısı:** Enerji ve kaynak verimliliğinin artırılması, atık üretiminin azaltılması ve çevresel performansın sürekli izlenmesi yoluyla, dijital ikizler binaların karbon ayak izini düşürmede ve net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmada kilit bir rol oynar [11].

9.2. Gelecek Adımlar ve Öneriler (Next Steps and Recommendations)

Dijital ikizlerin yapı sektöründe tam potansiyeline ulaşması için hem teknolojik hem de organizasyonel düzeyde atılması gereken adımlar bulunmaktadır:

- **Veri Standardizasyonu ve Birlikte Çalışabilirlik:** Sektör genelinde, sensör verilerinden BIM modellerine kadar tüm bilgi akışını kapsayan evrensel veri standartlarının geliştirilmesi ve benimsenmesi teşvik edilmelidir. Bu, farklı yazılım ve donanım sağlayıcıları arasında sorunsuz bir birlikte çalışabilirlik (interoperability) sağlayacaktır [57]. Açık kaynaklı platformlar ve API'lerin kullanımı desteklenerek veri entegrasyonu kolaylaştırılmalıdır.
- **Pilot Projelerin ve Vaka Çalışmalarının Artırılması:** Farklı yapı tiplerinde ve ölçeklerinde daha fazla pilot proje başlatılarak dijital ikizlerin gerçek dünya performansları ve yatırım getirileri (ROI) somutlaştırılmalıdır. Bu çalışmaların sonuçları şeffaf bir şekilde paylaşılmalı, böylece potansiyel benimseyiciler için bir öğrenme kaynağı oluşturulmalıdır. Özellikle kamu projelerinde dijital ikiz teknolojilerinin kullanımı teşvik edilerek, sektörün genel adaptasyonuna öncülük edilmelidir.
- **İnsan Kaynağı Gelişimi ve Eğitim:** Üniversite ve mesleki eğitim kurumlarının müfredatına BIM, IoT, yapay zeka, büyük veri analizi ve dijital ikiz entegrasyonu konuları daha kapsamlı bir şekilde dahil edilmelidir. Mevcut sektör profesyonelleri için dijital okuryazarlık ve dijital ikiz becerileri geliştirmeye yönelik sürekli eğitim ve sertifikasyon programları düzenlenmelidir [4]. Bu, teknolojinin etkin bir şekilde kullanılması için gerekli olan kalifiye iş gücünü sağlayacaktır.
- **Yasal ve Düzenleyici Çerçevelerin Geliştirilmesi:** Veri güvenliği, veri gizliliği ve veri sahipliği gibi konularda net yasal ve düzenleyici çerçevelerin oluşturulması büyük önem taşımaktadır [59]. Bu, paydaşların güvenini artıracak ve teknolojinin yaygınlaşmasını destekleyecektir. İnşaat ruhsatlandırma ve bina işletme yönetmeliklerinde dijital ikiz kullanımı için teşvikler ve şartlar değerlendirilebilir.
- **Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge) Yatırımlarının Artırılması:** Dijital ikiz teknolojilerini daha da ileriye taşımak için yapay zekâ algoritmalarının geliştirilmesi, sensör teknolojilerinin minyatürleştirilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması gibi alanlarda Ar-Ge yatırımları teşvik edilmelidir. Özellikle tahmine dayalı ve reçeteli analitiklerin yapısal performans, malzeme bozulması ve kullanıcı davranışları gibi karmaşık alanlara uygulanması üzerine araştırmalar yoğunlaştırılmalıdır.

9.3. Karşılaştırmalı Bakış: Geleneksel Yöntemler vs. Dijital İkiz (Comparative View: Traditional Methods etc. Digital Twin)

Dijital ikiz teknolojilerinin gelişimi, inşaat sektörünü daha akıllı, sürdürülebilir, güvenli ve verimli bir hale getirir. Bu dönüşüm, sadece yapı tasarımı ve inşasını değil, bakım, yönetim ve yapıların uzun vadeli performansını da kökten değiştirmektedir.

Dijital ikiz teknolojileri, yapıların sensör verileri aracılığıyla gerçek zamanlı performansının izlenmesine olanak tanıyarak, yapı ömrü boyunca depremler, yüklemeler ve çevresel etkiler gibi faktörlere karşı davranışını sürekli takip etmeyi mümkün kılar. Bu veriler sayesinde geleneksel **"arıza sonrası müdahale"** yaklaşımı yerine tahmine dayalı bakım gerçekleştirilebilir; böylece olası arızalar veya yapısal bozulmalar önceden tespit edilerek maliyetler azaltılır. Ayrıca mühendisler ve mimarlar, dijital ikizler yardımıyla tasarım varyasyonlarını simüle ederek daha verimli, dayanıklı ve ekonomik çözümler geliştirebilirler. Yapıların tüm yaşam döngüsü boyunca enerji verimliliği, kullanıcı konforu ve sürdürülebilirlik gibi performans göstergeleri optimize edilirken, farklı disiplinlerden ekiplerin aynı veriye erişimi sayesinde etkin işbirliği ve veri paylaşımı sağlanır. Bu süreçler, bilgiye dayalı karar verme yoluyla proje süresinin kısalmasına, hata oranlarının azalmasına ve yapım ile bakım maliyetlerinin düşmesine katkıda bulunur. Özellikle deprem gibi afet senaryolarında, dijital ikizler hasar tespiti ve müdahale planlamasında önemli roller üstlenir. Son olarak, yapı kullanım aşamasında enerji tüketiminin optimize edilmesiyle karbon emisyonları düşürülerek sürdürülebilir inşaat uygulamaları teşvik edilir. Aşağıdaki Tablo 2, dijital ikiz yaklaşımının geleneksel yapı yönetimi ve işletme yöntemlerine kıyasla sunduğu temel farklılıkları ve avantajları özetlemektedir.

Tablo 2. Geleneksel Yapı Yönetimi ve İşletme Yöntemi İle Dijital İkiz Tabanlı Yönetim Karşılaştırması (Table 2. Comparison of Traditional Construction Management and Operation Method and Digital Twin Based Management)

Özellik / Yaklaşım	Geleneksel Yönetim ve İşletme	Dijital İkiz Tabanlı Yönetim
Veri Entegrasyonu	Sınırlı, genellikle dağınık ve silolu	Kapsamlı, gerçek zamanlı, entegre ve merkezi
Analiz Yeteneği	Geriye dönük, tanımlayıcı	Geriye dönük, tanımlayıcı, tanısal, tahmine dayalı, reçeteli
Simülasyon	Kısıtlı, manuel, maliyetli	Gelişmiş, otomatik, sanal ortamda risksiz
Bakım Yaklaşımı	Reaktif (arıza sonrası), periyodik	Proaktif (arıza öncesi), tahmine dayalı
Maliyet Yönetimi	Düzeltici faaliyetler yüksek maliyetli	Optimizasyon ve önleyici tedbirlerle maliyet tasarrufu
Risk Yönetimi	Olay sonrası müdahale	Erken uyarı, proaktif risk azaltma
Sürdürülebilirlik	Kısıtlı izleme, manuel raporlama	Sürekli izleme, optimizasyon, karbon ayak izi azaltma
Karar Alma	Sezgisel, tecrübeye dayalı	Veri odaklı, kanıta dayalı, otomatik destekli
Şeffaflık	Düşük, bilgi paylaşımı zor	Yüksek, paydaşlar arası kolay bilgi erişimi

Sonuç olarak, yapıların dijital ikizleri, inşaat sektöründe verimlilik, güvenlik, maliyet etkinliği ve sürdürülebilirlik açısından eşi benzeri görülmemiş bir potansiyel sunmaktadır. Bu potansiyelin tam olarak gerçekleştirilmesi için, teknolojik gelişimin yanı sıra,

endüstriyel işbirliği, eğitim ve düzenleyici çerçevelerin güçlendirilmesi gerekmektedir. Gelecekte, dijital ikizler sadece binaları yönetme şeklimizi değil, aynı zamanda kentlerimizi ve yaşam alanlarımızı tasarlama ve deneyimleme biçimimizi de kökten değiştirecektir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

FİNANSAL AÇIKLAMA (FINANCIAL DISCLOSURE)

Yazarlar bu çalışma için herhangi bir mali destek almadığını beyan etmiştir.

ETİK STANDARTLAR BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Makalenin yazarları bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Tao, F. and Zhang, M., (2017). Digital Twin technology framework and its application. Proceedings of the 2017 1st IEEE Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS) (pp. 1-7). IEEE.
[2] Grieves, M. and Vickers, J., (2017). Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F. K. Gozukara (Ed.), Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches (pp. 85-113). Springer International Publishing.
[3] Fuller, A., Fan, Z., Day, C., and Barlow, C., (2020). Digital Twin: Enabling technologies, challenges and open research. IEEE Access, 8, 10895-10905.
[4] Madni, A.M., Madni, C.C., and Liu, S., (2019). Digital Twin: Applications, benefits, challenges, and future research directions. IEEE Access, 7, 79437-79450.
[5] Grieves, M., (2011). Virtually perfect: Driving innovation and profitability with digital twins. John Wiley & Sons.
[6] Boschert, S. and Heinemann, J., (2016). Digital Twin: The technology behind cyber physical systems. Springer.
[7] Cimino, C., Negri, E., and Fumagalli, F., (2017). Towards a more effective product lifecycle management using Industrial IoT and Digital Twin. Procedia CIRP, 62, 25-30.
[8] Autodesk. (n.d.). What is a digital twin? Retrieved from https://www.autodesk.com/solutions/digital-twin
[9] Liu, J., Feng, Y., Zheng, C., and Zhang, J., (2021). Review of the application of digital twin in the building sector. Buildings, 11(8): 329.
[10] Mylonas, C.M., Louvaris, A.S., Mitoulis, S.A., and Psycharis, I.N., (2023). Digital twins for the seismic assessment of existing buildings. Engineering Structures, 276, 115340.
[11] Barlish, K. and Sullivan, T., (2012). How to measure the benefits of BIM – A case study approach. Journal of Building Information Modeling, 6(1): 1-17.
[12] Kaewunruen, S., Xu, T., and Susiki, T., (2019). Digital Twin for smart railway infrastructure management. Journal of Infrastructure Systems, 25(3), 04019018.
[13] Sepasgozar, S.M.E., (2021). A systematic review on applications of Digital Twin technology in smart cities. Applied Sciences, 11(11): 5344.

[14] Hocaoğlu, M.M., (2022). Yapı bilgi modelleme'den dijital ikiz'e doğru: Akıllı tesis yönetimini etkinleştirme (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul: Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi
[15] Yiğit, A.Y. ve Uysal, M., (2024). Automatic crack detection (...). Journal of Building Engineering, Article 109952. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109952
[16] Özcan, O. ve Akay, S.S., (2022). Paşabağ bölgesi peri bacaları (...). In VIII. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS), Ankara.
[17] Kumaş, E. ve Erol, S., (2021). Endüstri 4.0'da dijital ikizler. PlanARCH.
[18] Ni, Z., Zhang, C., Karlsson, M., and Gong, S., (2023). Leveraging Deep Learning and Digital Twins for Energy Optimization of Historical Buildings. arXiv preprint arXiv:2301.06257. https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.06257
[19] Ritto, T.G. and Rochinha, F.A., (2020). Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures. arXiv preprint arXiv:2005.10964. https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.10964
[20] Boje, C., Guerriero, A., Revet, D., and Thomsen, J., (2017). The digital twin as a construction management tool. Procedia Engineering, 196, 1073-1081.
[21] Khajavi, S.H., Motlagh, N.H., Jaribion, A., Werner, L.C., and Holmström, J., (2020). Digital Twin: Vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. Automation in Construction, 114, 103179. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179
[22] Angjeliu, G., Coronelli, D., and Cardani, G., (2022). Digital twin application in heritage facilities management: A review. Facilities, 40(13/14), 784–804. https://doi.org/10.1108/F-01-2021-0010
[23] To, A., Liu, M., Muhammad, A., Shen, Z., and Xu, Y., (2021). Drone-based AI and 3D Reconstruction for Creating Digital Twins of Buildings. arXiv preprint arXiv:2107.00122. https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.00122
[24] Akanmu, S., Şahin, M., and Yılmaz, Y., (2021). Evaluation of the digital twin concept in the construction industry. PlanARCH – Design and Planning Research.
[25] PlanARCH. (2022). Yapım sektöründe dijital ikiz kavramının yapı yaşam döngüsü kapsamında değerlendirilmesi. PlanARCH
[26] Çalış Duman, M., (2022). İşletmeler için yeni bir verimlilik teknolojisi: Dijital ikiz. Productivity Journal of Productivity, Özel Sayı: Dijital Dönüşüm ve Verimlilik.
[27] Türk Yapısal Çelik Derneği (TUCSA). (2023). İnşaat sektöründe dijitalleşme. TUCSA.
[28] Ceylan, E.Z., (2021). Dijital ikizler ve inşaat sektöründeki yeri. Yapı Bilgi Modelleme, 1(2): 53–61.
[29] Xu, J., Shu, X., Qiao, P., Li, S., and Xu, J., (2023). Developing a digital twin model for monitoring building structural health by combining a building information model and a real-scene 3D model. Measurement, 217, 112955.
[30] Hoskere, V., Narazaki, Y., and Spencer, B.F., (2022). Digital twin techniques help in the assessment of structural conditions of buildings after earthquakes. ScienceDirect.
[31] Sensors Editorial Board. (2024). Approach towards the development of digital twin for structural infrastructure: A comprehensive review. Sensors, 25(1): 59.
[32] Hosamo, H.H., Nielsen, H.K., Alnmr, A.N., Svennevig, P.R., and Svidt, K., (2022). A review of the digital twin technology for

fault detection in buildings. Frontiers in Built Environment, 8, 101319.
[33] Zhang, X., Liu, Y., Wang, A., and Chen, Z., (2024). Digital twins in construction: Architectures, applications, trends and challenges. Building Research & Information.
[34] Kwon, O., Lim, W., and Jung, Y., (2014). Building Information Modeling (BIM) and facility management (FM): A review of the literature. International Journal of Building Information Modeling, 3(2): 1-10.
[35] Azhar, S., (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. Leadership and Management in Engineering, 11(3): 241-252.
[36] Li, L., Fu, Y., Wu, S., and Li, Q., (2021). BIM-GIS integration for digital twin of infrastructure: A review. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(5): 323.
[37] Patel, N., Khan, M.K., and Ahmad, S., (2020). IoT based digital twin architecture for smart manufacturing. Procedia Computer Science, 173, 262-270.
[38] Shahriar, H., Khan, M.A., and Rahman, M.M., (2021). A review of digital twin in smart cities: Technologies, applications, and challenges. Journal of Urban Management, 10(3): 296-309.
[39] Al-Hussein, M., Al-Hammadi, H., and Al-Hussein, M.A., (2020). Digital Twin for Construction: A comprehensive approach. CRC Press.
[40] Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., and Cheng, Y., (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 95(3-4). 1735-1746.
[41] IBM. (n.d.). What is descriptive analytics? Retrieved from https://www.ibm.com/topics/descriptive-analytics
[42] Davenport, T.H., (2014). Big data at work: Dispelling the myths, uncovering the opportunities. Harvard Business Review Press.
[43] Aggarwal, C.C., (2017). Outlier Analysis. Springer.
[44] Jardine, A.K.S., Lin, D., and Banjevic, D., (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing, 20(7): 1483-1510.
[45] Davenport, T.H. and Harris, J.G., (2017). Competing on analytics: The new science of winning. Harvard Business Review Press.
[46] LeCun, Y., Bengio, Y., and Hinton, G., (2015). Deep learning. Nature, 521(7553), 436-444. https://doi.org/10.1038/nature14539
[47] Aydın, Ö. ve Akın, E., (2024). Asenkron motorlarda kırık rotor çubuklarının erken teşhisi: transfer öğrenme yaklaşımlarının değerlendirilmesi. 19(4):42-52, DOI:10.12739/NWSA.2024.19.4.2A0200.
[48] Crawley, D.B., Hand, J.W., Kummert, M., and Griffith, B.T., (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Building and Environment, 43(4): 661-673.
[49] Choudhary, R. (2012). Building performance simulation for design and operation. Earthscan.
[50] Guo, P., Du, B., and Chen, J., (2018). A review of crowd simulation models and their applications. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 22(3), 503-514.
[51] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., and Liston, K., (2011). BIM handbook: A guide to building information modeling for

owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons.
[52] Wang, F. and Yuan, M., (2020). Digital Twin technology in intelligent construction: A review. Journal of Cleaner Production, 272, 122825.
[53] Sacks, R., Eastman, C., and Lee, G., (2018). BIM Handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons.
[54] Aydın, Ö. ve Akın, E., (2021). Endüstri 4.0 tabanlı üretim sistemleri ve kestirimci bakım yaklaşımlarında digital ikiz uygulamalarının incelenmesi. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi, 33(2): 167-178, 2021.
[55] Pătrăucean, V., Scherer, S., and Leal, V., (2015). A survey of 3D scanning technologies and their applications in architecture, engineering, and construction. Automation in Construction, 59, 239-253.
[56] Remondino, F. and Fraser, C.S., (2009). Digital camera calibration methods: An overview. Photogrammetric Record, 24(125): 31-51.
[57] ISO. (2018). ISO 19650-1:2018 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles. International Organization for Standardization.
[58] Demirkesen, S. and Ozorhon, B., (2022). Challenges and opportunities of digital twins in the construction industry. Journal of Construction Engineering and Management, 148(4): 04022019.
[59] Salloum, S., Dautov, R., Chen, X., and Zomaya, A.Y., (2020). Big data privacy: A survey. International Journal of Computer Systems Science & Engineering, 35(2): 65-88.
[60] Turk, S. and Serdar, M., (2020). A blockchain-based framework for digital twin in smart buildings. Automation in Construction, 114, 103178.
[61] Lam, J.C., Lu, R., and Yan, H., (2017). Virtual Singapore: A smart nation initiative. IEEE Pervasive Computing, 16(3): 85-88.
[62] VTT (VTT Technical Research Centre of Finland). (2020). Helsinki's digital twin as a heart for smart city development. Retrieved from https://www.vttresearch.com/en/news-and-insights/news/helsinkis-digital-twin-heart-smart-city-development
[63] Bentley Systems. (n.d.). One Za'abeel Case Study. Retrieved from https://www.bentley.com/software/one-zaabeel
[64] ICE (Institution of Civil Engineers). (n.d.). Crossrail's digital twin journey. Retrieved from https://www.ice.org.uk/news-and-insight/the-civil-engineer/june-2021/crossrail-digital-twin
[65] Wang, F., Zhang, J., and Wang, Y., (2020). Digital Twin-driven smart building management system. Journal of Building Engineering, 32, 101784.