

T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



İNŞAAT SEKTÖRÜNDE BIM İLE DİJİTAL İKİZLERİN
KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra SARIAY

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Programı

OCAK, 2024

T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



İNŞAAT SEKTÖRÜNDE BIM İLE DİJİTAL İKİZLERİN
KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra SARIAY
(Y2113.090009)

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Kaveh DEHGHANIAN
Eş Danışman: Doç. Dr. Sevilay DEMİRKESEN ÇAKIR

OCAK, 2024

ONAY FORMU

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “İNŞAAT SEKTÖRÜNDE BIM İLE DİJİTAL İKİZLERİN KARŞILAŞTIRILMASI” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Kaynakça’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (04/01/2024)

Esra SARIAY

ÖNSÖZ

“İNŞAAT SEKTÖRÜNDE BIM İLE DİJİTAL İKİZLERİN KARŞILAŞTIRILMASI“ adlı konuyu bana önererek tez çalışmam boyunca ihtiyaç duyduğum her anda bilgi birikimini, deneyimini ve desteğini esirgemeyen değerli görüş ve önerileri ile çalışmama büyük katkı sağlayan danışman hocam Sn. Doç. Dr. Sevilay DEMİRKESEN ÇAKIR’a teşekkürlerimi sunarım. Lisanstan beri danışmanım olan ve her zaman bana bilgi ve tecrübeleriyle yol gösterici olan değerli hocam Sn. Dr. Öğr. Üyesi Kaveh DEGHANIAN’a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında bana maddi ve manevi yönden desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme ve kızım Esila’ya gösterdikleri sabır ve anlayış için teşekkür ederim.

Ocak, 2024

Esra SARIAY

İNŞAAT SEKTÖRÜNDE BIM İLE DİJİTAL İKİZLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

İnternet aracılığıyla veri ve bilgi alışverişine dayalı yeni teknolojilerin ortaya çıkması bir bütün olarak endüstride devrime yol açmıştır. İnşaat sektörü, teknolojik değişikliklere karşı bilinen direncine rağmen Endüstri 4.0 ile dijital ikiz teknolojilerin benimsenmesi de dahil olmak üzere mevcut devrimin faydalarını bir araya getirmek amacıyla farklı yöntemler kullanılmaktadır. İlk olarak imalatta uygulanan Endüstri 4.0 kısa sürede yayılarak diğer birçok alanın dinamiklerini değiştirmiştir ve bu değişim ile birlikte BIM (Yapı Bilgi Modelleme) ve DT (Dijital ikiz) kavramları kullanılmaya başlanmıştır. BIM, bir binanın dijital bir temsilidir. BIM'deki 3D yapı öğeleri, tesis yöneticilerine birçok veri türünü geri alma, analiz etme ve işleme olanağı sağlayan, kolay gezinilebilir bir görsel platform sunmaktadır. Sanal âlemde gerçek fiziksel ortamları yeniden yaratmak için teknolojik yeniliklerin uygulanmasından oluşan dijital ikiz kavramı da bu bağlamda ortaya çıkmıştır. DT'ler, fiziksel ortamları sanal modellerde çoğaltmak için kullanılmaktadır. Dijital ikiz modeller, gerçek varlığın doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlamak için bir ürünün yaşam döngüsü boyunca güncel bilgilerle sağlanmalıdır. Dijital ikiz modelleri, proje tasarımından binanın işletim, bakım ve iyileştirme aşamalarına kadar bir inşaat projesinin yaşam döngüsü boyunca geniş bir uygulanabilirliğe sahip olmaktadır. Dijital dönüşümün kaçınılmaz bir trendi olan dijital ikiz, şehirlerin gerçek zamanlı uzaktan izlemenin gerçekleştirilmelerine yardımcı olur ve daha etkili karar verme olanağı da sağlamaktadır.

Bu çalışmanın konusu BIM ve Dijital İkizlerin inşaat projelerinde kullanımının incelenmesi ve ortak kullanımın proje başarısına etkilerinin incelenmesidir. Bu kapsamda, derinlemesine literatür araştırması yapıldıktan sonra REVİT programının öğrenci versiyonu kullanılarak örnek bir model oluşturulup karşılaştırması yapılmıştır. BIM ve DT arasındaki benzerlikler ve farklılıklar tespit edilip karşılaştırmalı bir

Çizelgede gösterilmiştir. Sonuç olarak, inşaat projelerinin verimliliğinin artmasını sağlamak ve projelerin daha az hata ile gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu kapsamda www.houseplans.com sitesinden bir yapı referans alınarak REVİT programında 3D modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model 2 katlı ve 733m² ‘dir. 2 oturma odası, 1 mutfak, 1 çalışma odası, 1 erzak odası, 5 yatak odası, 1 giyinme odası, 4 banyo, 1 WC, 1 amaşır odası, 1 tü odası, 3 garaj ve 1 n sundurmada oluşmaktadır. Modeli oluşturulurken ilk olarak akslar, sonra ana kat ve ikinci kat planları çizilmiş ve çatı oluşturulmuştur. Daha sonra, modele n ve arka sundurmalar ve çatıları eklenmiştir. Kapılar, pencereler ve mobilyalar oluşturulan model ile uyumlu olacak şekilde yerleştirilmiştir ve mobilyalar da www.BIMObject.com sitesinden alınmıştır. Oluşturulmuş bu BIM modeline RFID, AI, IoT ve sensörlerden elde edilen verilerle desteklenerek dijital dönüşümü gerçekleştirilebilmektedir. Bu şekilde oluşturulmuş modellerde BIM’in faydaları artırılarak tasarlandığından kaynak israfı nlenilebilmekte ve daha verimli yapılar elde edilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: BIM, Yapı Bilgi Modelleme, Dijital İki, IoT, Nesnelerin İnterneti.

COMPARISON OF BIM AND DIGITAL TWINS IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

ABSTRACT

The emergence of new technologies based on the exchange of data and information via the Internet has led to a revolution in the industry as a whole. Despite its known resistance to technological changes, the construction industry is using different methods to bring together the benefits of the current revolution, including the adoption of Industry 4.0 and digital twin technologies. Industry 4.0, which was first applied in manufacturing, spread in a short time and changed the dynamics of many other areas, and with this change, BIM (Building Information Modeling) and Digital twin (DT) concepts began to be used. BIM is a digital representation of a building. 3D building elements in BIM provide facility managers with an easily navigable visual platform that allows them to retrieve, analyze and process many types of data. The concept of digital twin, which consists of the application of technological innovations to recreate real physical environments in the virtual world, has also emerged in this context. DTs are used to replicate physical environments in virtual models. Digital Twin Models must be provided with up-to-date information throughout a product's lifecycle to ensure an accurate representation of the actual entity. Digital twin models have broad applicability throughout the lifecycle of a construction project, from project design to the building's operation, maintenance and rehabilitation phases. Digital twin, an inevitable trend of digital transformation, helps cities perform real-time remote monitoring and also enables more effective decision-making.

The subject of this study is to examine the execution of construction projects using BIM and Digital Twins and to examine the effects of common use on project success. In this context, after an in-depth literature review, two models were created using the student version of the REVIT program and these models were compared. Similarities and differences between BIM and DT were identified and shown in a

comparative table. As a result, it is aimed to increase the efficiency of construction projects and to realize the projects with fewer errors.

A 3D model was created in the Revit program by reference to a building from www.houseplans.com. The generated model is 2 floors and 733m². 2 living rooms, 1 kitchen, 1 study room, 1 supplies room, 5 bedrooms, 1 dressing room, 4 bathrooms, 1 WC, 1 laundry room, 1 ironing room, 3 garage and 1 front porch. When creating the model, the axes were first drawn, then the main floor and second floor plans were drawn and the roof was created. Then, the front and back sailings and roofs were added to the model. Doors, windows and furniture are placed in harmony with the created model, and the furniture is also taken from www.BIMobject.com. This created BIM model can be supported by supporting the data obtained from RFID, AI, IoT and sensors. Since the benefits of BIM are designed by increasing the benefits of BIM in this way, waste wasting can be prevented and more efficient structures can be obtained.

Keywords: BIM, Building Information Modelling, Digital Twin, IoT, Internet of Things.

İÇİNDEKİLER

ONUR SÖZÜ	i
ÖNSÖZ.....	iii
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xvii
I. GİRİŞ	1
A. Tezin Kapsamı	3
1. Tezin Amacı	3
2. Problemin Tanımı.....	4
II. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
A. BIM (Yapı Bilgi Modelleme).....	5
1. BIM Teknolojisi Tarihi ve Dünyada Kullanımı.....	6
2. BIM Uygulama Alanları	8
3. BIM'in Kullanımı ve Boyutları.....	9
4. Şirketlerin BIM Sistemine Entegrasyonu.....	10
5. BIM Standartları.....	11
6. BIM'in Yaşam Döngüsü	14
7. BIM ve GIS Entegrasyonu	18
8. BIM'in AEC Sektörüne Etkisi	19

9.	BIM Enerji Modeli	21
10.	Avantaj ve Dezavantajları	23
B.	DT (Dijital İkiz)	25
1.	DT Bileşenleri	26
2.	Veri Entegrasyon Düzeyi	28
3.	DT Çalışma Mekanizması	29
4.	Dijital İkiz Teknolojisi ve Geçmişi	32
5.	Dijital İkizi Mümkün Kılan Teknolojiler	35
6.	IoT (Nesnelerin İnterneti).....	37
7.	CPS (Siber Fiziksel Sistemler).....	41
8.	Blockchain.....	43
9.	RFID (Radyo Frekanslı Tanımlama).....	44
10.	Dijital İkizlerin Uygulama Alanları ve İşlevleri	45
11.	İnşaat Sektörünün Dijital Geçışı	46
12.	Dijital İkizlerin İnşaat Sektöründe Kullanımı	48
13.	AEC Endüstrisinde Dijital İkiz	50
14.	Enerji Sistemlerinin Dijitalleşmesi.....	52
15.	Avantaj ve Dezavantajları	53
III.	YÖNTEM.....	59
IV.	3D MODEL	61
V.	BULGULAR VE TARTIŞMA	77
VI.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	101
VII.	KAYNAKÇA	105
ÖZGEÇMİŞ.....		117

KISALTMALAR LİSTESİ

- 2D** : İki Boyutlu (Two Dimensions)
- 3D** : Üç Boyutlu (Three Dimensions)
- 4D** : Dört Boyutlu (Four Dimensions)
- 5D** : Beş Boyutlu (Five Dimensions)
- AEC** : Mimarlık, Mühendislik, İnşaat (Architecture, Engineering, Construction)
- AI** : Yapay Zekâ (Artificial Intelligence)
- AECO**: Mimarlık, Mühendislik, İnşaat ve İşletmeler (Architecture, Engineering, Construction, and Operations)
- AR** : Artırılmış Gerçeklik (Augmented Reality)
- BIM** : Yapı Bilgi Modelleme (Building Information Modelling)
- BIMS** : Yapı Bilgi Modelleme Sistemleri (Building Information Modelling Systems)
- BMI** : BIM Olgunluk Endeksi (BIM Maturity Index)
- BSI** : Britanyalı/İngiliz Standartları Enstitüsü (British Standards Institution)
- BT** : Yapı Teknolojisi (Building Technology)
- CE** : Yapı Mühendisliği (Construction Engineering)
- CMMS**: Bilgisayarla Bakım Yönetim Sistemleri (Computerised Maintenance Management Systems)
- CAD** : Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
- CDE** : Ortak/İşbirlikçi Geliştirme Ortamı (Collaborative/Common Development Environments)
- CO₂** : Karbondioksit (Carbon dioxide)
- CPS** : Siber Fiziksel Sistemler (Cyber Physical Systems)
- COBie**: Yapı İşlemleri Yapı Bilgi Alışverişi (Construction Operations Building Information Exchange)
- CAE** : Bilgisayar Destekli Mühendislik (Computer Aided Engineering)
- CB** : Bilişsel Yapı (Cognitive Building)

DT : Dijital İkiz (Digital Twin)
DTS : Dijital İkiz Sistemleri (Digital Twin Systems)
DLT : Dağıtılmış Defter Teknolojisi (Distributed Ledger Technology)
DM : Dijital Model (Digital Model)
DS : Dijital Gölge (Digital Shadow)
DSR : Tasarım Bilimi Araştırması (Design Science Research)
FM : Tesis Yönetimi (Facilities Management)
GIS : Coğrafi Bilgi Sistemleri (Geographical Information System)
GPS : Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)
HVAC: Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (Means Heating, Ventilation And Air Conditioning)
H&S : Sağlık ve Güvenlik (Health and Safety)
H-BIM: Tarihi Bina Bilgileri Modelleme (Historical Building Information Modeling)
IFC : Endüstri Temel Sınıfları (Industry Foundation Classes)
IC : Akıllı Sıkıştırma (Intelligent Compress)
ISG : İş Sağlığı ve Güvenliği (Occupational Health and Safety)
LiDAR: Işın Algılama ve Mesafe Ölçme (Light Detection and Range)
LoRa : Uzun Menzili Radyo Teknolojisi (Long-Range Radio Technology)
MEP : Mekanik, Elektrik ve Tesisat (Mechanical, Electrical and Plumbing)
M2M : Makineden Makineye (Machine to Machine)
MR : Karma Gerçeklik (Mixed Reality)
nZEB : Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar (The Nearly Zero Energy Buildings)
NASA : Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
NFC : Yakın Alan İletişimi (Near Field Communication)
O&M : İşletme ve Bakım (Operation and Maintenance)
PC : Prekast Bileşenler (Precast components)
PCD : Nokta Bulutu Verileri (Point Cloud Data)
PLM : Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (Product Lifecycle Management)
RFID : Radyo Frekansı ile Tanımlama (Radio Frequency Identification)
RES : Yenilenebilir Enerji Kaynakları (Renewable Energy Sources)
VPL : Görsel Programlama Dili (Visual Programming Language)
VR : Sanal Gerçeklik (Virtual Reality)

Wi-Fi : Kablosuz Bağlantı (Wireless Connection)

WSN : Kablosuz Sensör Ağlar (Wireless Sensor Networks)

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1 BIM ve DT Karşılaştırılması (Shahzad et al., 2022) (Çeviren: Sariay E.).	81
---	----

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1 Tez Akış Şeması	3
Şekil 2 BIM Konseptinin Görsel Temsili (Torrecilla-Garcia et al., 2021) (Çeviren: Sariay E.).....	6
Şekil 3 BIM Olgunluk Düzeyleri (Akgün, 2016).....	8
Şekil 4 BIM Boyutları (buildext.com, 2023)	10
Şekil 5 BIM'in Yaşam Döngüsü (idecad.com.tr, 2023)	16
Şekil 6 Dijital İkizlerin Çağrışımı (Wang et al., 2022) (Çeviren: Sariay E.).....	28
Şekil 7 Dijital İkiz Entegrasyon Düzeyleri (b3lab.org, 2023)	29
Şekil 8 Dijital İkiz İçin Önerilen Mimari (Guida et al., 2021) (Çeviren: Sariay E.)..	32
Şekil 9 Dijital İkizin Teknolojisi (Hosamo et al., 2022) (Çeviren: Sariay E.).....	35
Şekil 10 Yapı Ortamında IoT Algılama Uygulamaları (Cai et al., 2023) (Çeviren: Sariay E.).....	41
Şekil 11 Sitede Seçilen Evin 3D Görünümleri.....	62
Şekil 12 Sitedeki Ana ve İkinci Kat Planı Görüşleri.....	63
Şekil 13 Modelin Ön ve Arkadan Görünüşü.....	65
Şekil 14 Modelin Yanlardan Görünüşü.....	66
Şekil 15 Ana Katın Planı.....	67
Şekil 16 İkinci Katın Planı	68
Şekil 17 Gri Ahşap Kaplamalı Dış Duvarın Katmanları.....	69
Şekil 18 Kahve Ahşap Kaplamalı Dış Duvarın Katmanları.....	70
Şekil 19 Taş Kaplamalı Dış Duvarın Katmanları	71
Şekil 20 İç Duvarın Katmanları	72
Şekil 21 Çatının Katmanları.....	73
Şekil 22 Laminat Zemin Kaplamanın Katmanları	74
Şekil 23 Seramik Zeminin Kaplama Katmanları	75
Şekil 24 Taş Zemin Kaplamanın Katmanları.....	76

I. GİRİŞ

Dünya nüfusunun yaklaşık %55'i şehirlerde yaşamaktadır. Bu oranın gelecekte daha da artarak 2050 yılına kadar %70 değerine ulaşması ve bunun dünya çapında ek 1,2 milyon kilometrekare kentsel alana yayılması olarak beklenmektedir. Bugün, şehirler doğal kaynakların üçte ikisini tüketmekte ve sera gazlarının %70'inden fazlasını salarak hızlı kentsel genişleme, arazi ve doğal kaynakların kullanımı üzerinde önemli bir baskı oluşturmaktadır (Xia et al., 2022). En eski sektörlerden biri olan inşaat sektörü, sosyal ekonominin önemli bir parçasıdır. Antik çağlardan günümüze, inşaat endüstrisindeki ilgili teknolojiler zaman içinde adım adım gelişmektedir. Günümüzde Endüstri 4.0 kapsamında ileri teknolojiler hızla gelişmekte ve birçok endüstride kullanılmaktadır. Bununla birlikte, diğer sektörlerle karşılaştırıldığında inşaat sektöründeki teknolojik reformun hızı nispeten yavaştır. Bunun bir nedeni, inşaat sektörünün büyük olması ve çok fazla paydaşı içermesi, kapsamlı ve eş zamanlı bir reform gerçekleştirmeyi zorlaştırmasıdır. İnşaat sektörü hala dört zorlukla karşı karşıya durumdadır: (1) düşük kârlılık ve üretkenlik; (2) proje performansı bütçe kaygıları, (3) kalifiye işçilik eksikliği ve (4) sürdürülebilirlik sorunlarını içermektedir. Bu gibi sorunlar bir süre daha devam edecektir ve dijital ikizlerin test aracı olarak kullanılabilmesi de çözüm olarak görülmektedir.

BIM ve web teknolojilerinin geliştirilmesinde; heterojen veri setlerinin entegre edilmesine ve yenilikçi kullanıcı odaklı uygulamalar geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. İnşaat projesinin başarısı büyük oranda bilgi akışının yönetilmesine ve verilerin büyük bir hacimde işleyebilme ve faydalı bilgiler alabilmeye dayanmaktadır. Bilgi, kavramsal planlamadan kullanımdan almaya kadar yaşam döngüsü boyunca etkili bir şekilde değiştirilmelidir. Endüstri 4.0 yol haritasının temel öğelerinden biri fiziksel ve sanal alanın iletişim kurmasını sağlayan dijitalleştirme teknolojisi Dijital İkiz'dir. Dijital ikiz birden çok sektörde hızla benimsenirken teknoloji yapı verilerinden yararlanma potansiyeline sahiptir. BIM ve operasyonel bina verilerinin kullanımını artırmayı hedefleyen çeşitli çabalar uyarlanabilir etkileşimi sağlamak için

sanal modellerin ve fiziksel dünyanın entegrasyonunu ve çift yönlü koordinasyonu hala gelişme dönemindedir.

Bu teknoloji, gerçek dünya varlıklarının, süreçlerin, kişilerin ve yerlerin sanal olarak çoğaltılmasına çeşitli nedenlerden dolayı olanak tanımaktadır. Üretime geçmeden önce kuruluşlar yeni varlıkları ve prosedürleri test etmek, devam eden operasyonları geliştirmek ve sorunları daha pahalı ve çözülmesi daha zor olan gerçek dünyada üretime geçmeden önce insanları eğitmek için DT'ler kullanılmaktadır. DT'ler, tesis yönetimini, simülasyon görevlerini ve müdahalelerin merkezi yönetimini ve kaydını destekleyerek inşaat endüstrisini etkileme konusunda büyük bir potansiyele sahiptir. Teknolojik gelişme hem çevresel hem de ekonomik açıdan hızlı, özelleştirilebilir, esnek ve verimli çözümler için endüstrinin artan talep ve ihtiyaçları tarafından teşvik edilerek son yıllarda önemli bir ivme kazanmıştır.

Teknolojinin icadı ve gelişmesi sonucunda şehir terimi akıllı şehri dünya çapında yeni bir seviyeye taşımaktadır. Yeni teknolojilerin geliştirilmesi, doğrulanması ve uygulanması büyük miktarda yatırım gerektirmektedir. Ancak, yatırılan sermayenin belirli bir süre içinde geri kazanılıp kazanılamayacağı da hala belirsizdir. Bu da inşaat sektöründeki teknolojik yenilik için yetersizliğe yol açacaktır. Akıllı şehirler son yıllarda hızla gelişmektedir ve dijital teknoloji, kentleşme sorunlarını çözenin anahtarı olarak kabul edilmektedir. Yenilikçi bir kentsel gelişim konsepti ve modeli sunan akıllı şehirler, sürdürülebilir kentsel bilimsel yönetim ve gelişimin sağlanması için çok önemlidir.

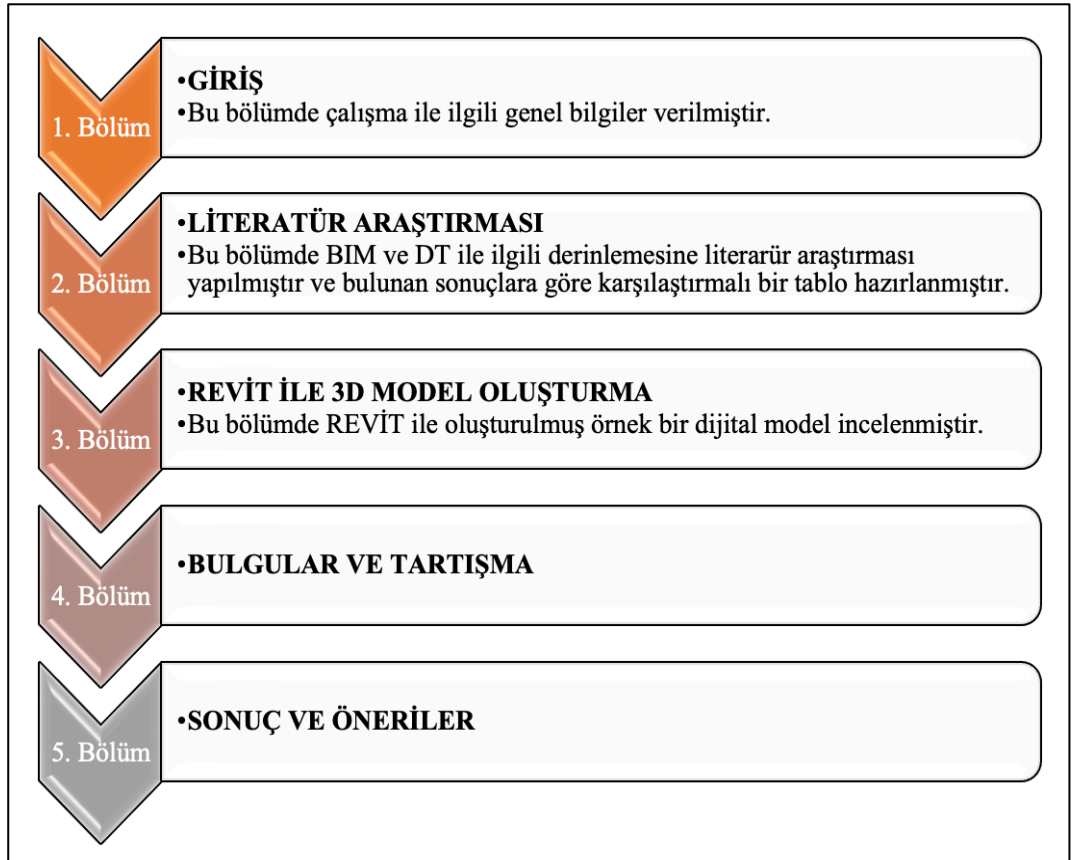
Tasarımdan nihai yıkıma kadar uzanan inşaat sektörü, birkaç temel aşamadan oluşmaktadır. Ünlü inşaat yazılımı sağlayıcısı Jonas, bir inşaat projesini başlangıç aşaması (tasarım/planlama), inşaat öncesi aşaması, tedarik aşaması, inşaat aşaması ve inşaat sonrası/kapanış aşaması olmak üzere beş aşamaya ayırmıştır. Ayrıca bir inşaat projesinden sonra bina, inşaat yaşam döngüsünün en uzun aşaması olan işletme ve bakım aşamasını tamamlamaktadır. Ardından binanın ömrünü sona erdirmek için yıkım çalışması da gerekmektedir. İnşaat sektörünün karmaşık yapısı ve farklı dinamikleri, dijital ikiz de dahil olmak üzere yeni teknolojiler için hem zorluklar hem de fırsatlar sağlayabilmektedir (Su et al., 2022).

A. Tezin Kapsamı

BIM ve DT ile ilgili bu tez kapsamında derinlemesine literatür araştırması yapılmıştır. Literatürden edinilen bilgilere göre BIM ve DT arasındaki benzerlikler ve farklılıklar tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgulara göre karşılaştırılmalı bir çizelge hazırlanmıştır. Daha sonra da REVİT programı yardımıyla örnek bir dijital model oluşturulup BIM ve dijital ikiz karşılaştırması yapılmıştır.

1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında inşaat sektöründe dijital teknolojilerin kullanımına yönelik farkındalık oluşturmak, inşaat projelerinin verimliliğinin artmasını sağlamak ve projelerin daha az hata ile gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır. Tezin içeriği Şekil 1’de gösterildiği gibi 5 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde bu çalışma ile ilgili genel bilgiler, problemin ortaya çıkışı ve tezin amacı, ikinci bölümde BIM ve DT üzerine literatür araştırması, üçüncü bölümde REVİT programı yardımıyla 3D modelin incelenmesi, dördüncü bölümde bulgular ve tartışma, beşinci bölümde de sonuç ve öneriler yer almaktadır.



Şekil 1 Tez Akış Şeması

2. Problemin Tanımı

Endüstri 4.0 devriminin ortaya çıkmasıyla dünya bir tür paradigma değişikliği yaşamaktadır. Endüstri 4.0 ve Yapı 4.0 ile birlikte dördüncü sanayi devrimi, siber fiziksel sistemler ve dijital teknolojiler ile gerçekleşmiştir. Dijitalleşme alanında geride kalmış olan inşaat sektöründe DT'nin sunulmasının ana nedenleri olarak dijitalleşmeyi destekleyen Endüstri 4.0 teknolojileri ve sürdürülebilir politikalar ortaya çıkmıştır. Endüstri 4.0'ın gelişimi ile birlikte inşaat sektörünün gelişimi de gittikçe hızlanmaktadır.

İnşaat sektörü dijital gelişimi açısından diğer sektörlerle nazaran çok daha yavaş ilerlemektedir. Bunun nedeni de inşaat işlerinde birçok farklı paydaşın olmasından kaynaklanmaktadır. Türk inşaat sektöründe geleneksel yöntemler daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Dolayısıyla paydaşlar arasındaki iletişim eksiklikleri 2D (İki Boyutlu) çizimlerden kaynaklı çakışmalar ve bunların neden olduğu maliyette artış, zaman kaybı ve teslimatta yaşanan gecikmelere neden olmaktadır. Bununla birlikte BIM'in kullanımı Türkiye'de ve dünyada gittikçe artmaktadır. Birçok ülke ve hükümet akıllı şehirleri küresel ısınma, nüfus artışı ve kaynak tükenmesi için bir çözüm olarak görmektedir.

II. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, derinlemesine literatür araştırması yapılmıştır. Yapılan araştırmaya göre edinilen bilgilerden BIM ve DT arasındaki benzerlikler ve farklılıklar tespit edilmiştir. Daha sonra bulunan sonuçlara göre karşılaştırmalı bir çizelge hazırlanmıştır.

A. BIM (Yapı Bilgi Modelleme)

BIM, son yıllarda en ilgi çekici teknolojilerden biri olmuştur (Han et al., 2022). Yapı bilgi modellemesi oluşturma, varlık yöneticilerine binaları ve ilişkili altyapıyı daha verimli bir şekilde yönetmek için gereken bilgi ve araçları sağlayan akıllı bir 3D (Üç Boyutlu) model tabanlı süreçtir (Roberts et al., 2021). BIM, fiziksel ve işlevsel özellikler hakkında kapsamlı veriler içeren bir tesisin sanal modelidir. Geleneksel bir 3D model olmasının yanı sıra bilgileri depolamakta ve işlemektedir. Bu, tüm nesnelere, 3D geometrik temsilden beklenen fiziksel özelliklerin yanı sıra işlevsel özelliklere de sahip olduğu anlamına gelmektedir (Visartsakul and Damrianant, 2023). BIM, mühendislik tasarımı, inşaatı ve yönetiminde kullanılan, bina verilerinin ve bilgilerinin entegrasyonuna dayalı olarak proje planlama, işletme ve bakımın tüm yaşam döngüsünde bina verilerinin paylaşımını ve iletimini gerçekleştiren dijital bir araçtır. Ardından, mühendislik ve teknik personel, tasarım ekibi, inşaat ve işletme birimleri de dahil olmak üzere tüm inşaat birimleri için işbirlikçi yardım modeli sağlayarak çeşitli bina bilgilerini anlayabilir ve bunlara etkin yanıt verebilmektedir. Bu dijital modellere dayalı olarak her cihazın, her parçanın ve her sensörün gelecekte bir dijital kopyası olacaktır (Wang et al., 2022).

BIM sistemleri, hedeflenen bina veya altyapı için benzersiz ve merkezi olan eksiksiz bir parametrik model oluşturmaya dayanmaktadır. Model yapısı için gerekli tüm elemanlar oluşturulur ve her eleman tanımı için gerekli parametreler (malzemeler, geometri, yapı sistemleri, tahminler...) belirlenmektedir. BIM sistemlerinde bir öğenin temsili çizilir ve belirtilen öğe tüm tasarım parametrelerini tahmin ederek ve

boyutlandırılarak modele dahil edilmektedir. BIM ile birlikte her bir ögenin ve ortamla ilişkisinin “dijital yapısı” yapılabilmektedir. Ayrıca model aynı anda farklı uzmanlar için hazırlanır ve altyapılar veya binalar (malzemeler, tahminler, yapıcı sistemler, ölçümler vb.) için gerekli tüm bilgileri içermektedir (Alonso et al., 2019).

BIM, iş birliklerinde bilgi merkezinde yaygın olarak kullanılmakta ve son on yılda inşaat sektöründe giderek daha fazla zorunlu hale gelmektedir. İşbirliğinin özü dijital bilgi alışverişidir. Bilgi açısından, BIM tabanlı veri okunabilirliği için üç paradigması vardır: (1) dosya tabanlı, (2) bulut tabanlı ve (3) blok tabanlıdır (Zhao et al., 2021). BIM konseptinin görsel temsili şekil 2’de gösterilmiştir.

B (YAPI)	I (BİLGİ)	M (MODELLEME)
<ul style="list-style-type: none">• Konut• Ticari• Sağlık Hizmeti• Kurumsal• Spor Dalları	<ul style="list-style-type: none">• Elementler• Miktarlar• Mekansal• Programlar• Operasyonlar	<ul style="list-style-type: none">• Mimari• Yapısal• MEP (Mekanik, Elektrik ve Tesisat)• Yönetmek

Şekil 2 BIM Konseptinin Görsel Temsili (Torrecilla-Garcia et al., 2021) (Çeviren: Sariay E.)

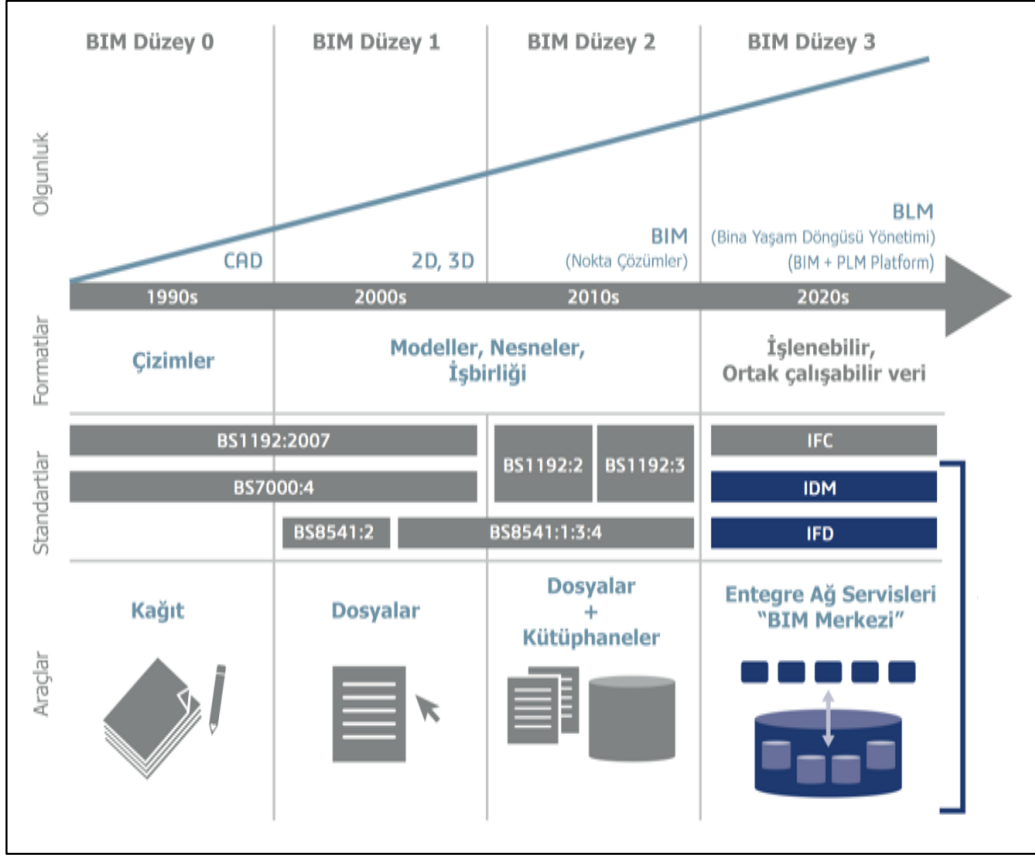
1. BIM Teknolojisi Tarihi ve Dünyada Kullanımı

BIM konsepti 1970'lerden beri var olan ilk konsepttir ve bir binanın tüm yaşam döngüsü boyunca planlama, inşaat ve bakım işlerini gerçekleştirmek ve geliştirmek amacıyla bilgi oluşturma, bilgilerinin doğru ve birlikte çalışabilen kaydını tutmak için dijital bir platform olarak tasarlanmıştır (Kit, 2022). BIM kavramı ilk olarak Eastman ve arkadaşları tarafından tanıtılmıştır. Daha sonra 1992 yılında BIM terimi ilk kez Nederveen ve Tolman tarafından kullanılmıştır (Visartsakul and Damrianant, 2023). Çok sayıda yazılım projesinin yaptığı gibi yeniden arama ile başlamıştır. BIM olarak tanınmadan önce Chuck Eastman gibi araştırmacılar “Building Description System (İnşa Tanımı Sistemi)” terimini kullanmıştır. Dijital İkizler ile birkaç yıl deneyden sonra Autodesk ve Bentley Systems 2000 başlarında teknolojiyi kullanmaları ile tanınmıştır. BIM ilk araştırma günlerinden bu zamana kadar evrim geçirmiş olsa da temel hedefi aynı kalmıştır (Sun and Liu, 2022). BIM modelleme, mimarlar ve mühendisler için yapı tasarımını desteklemek amacıyla 2000'lerin başında kullanılmaya başlanmıştır. Bunlar, hazırlık ve tasarım iyileştirmesine, çakışma algılamasına, görselleştirmeye, nicelleştirmeye, maliyet ve veri yönetimi konusuna

odaklanılmıştır. Buna ek olarak, enerji analizi, yapısal analiz, programlama, ilerleme takibi ve şantiye güvenliği gibi temel işlevler de eklenmiştir (Roberts et al., 2021).

Önde gelen bir yazılım şirketi olan Autodesk, 2003 yılında BIM konseptine uygun olarak geliştirdiği yazılımını göstermek için bir teknik inceleme yayınlamıştır. BIM yazılım geliştirmesini başlattı ve geniş kapsamlı işlevselliğe sahip önemli bir BIM yazılım serisini yaymıştır. Ancak, geleneksel endüstri uygulamalarını değiştirmek zorlayıcı olmuştur. CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım), tasarım süreçlerine yardımcı olan bir yazılımdır. CAD, bu dönüşümün hızlandırılmasında özellikle 2D tabanlı bilgidan 3D tabanlı bilgiye geçişte daha verimli belgelere dönüşmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır (Visartsakul and Damrianant, 2023). On yıldan uzun süredir BIM, tasarım oluşturmaya bütünsel olarak yaklaşmak, önemli paydaşlar arasında iletişimi ve iş birliğini geliştirmek, üretkenliği artırmak, nihai ürünün genel kalitesini iyileştirmek, inşaat sektörünün parçalanmasını azaltmak ve verimliliğini artırmak için en önemli yenilik araçlarından biri olmuştur (El Jazzer et al., 2020).

Tasarımın görselleştirilmesi ve tutarlılığı, çakışma tespiti, maliyet, zaman hesaplaması ve paydaşlarla birlikte çalışabilirliğini daha etkin hale getirmek için mimari mühendislik ve tesis yönetimi işlevlerinde kullanılmaktadır. BIM, çoğunlukla kâğıt çizimlerle yapılan 1990'lardaki Seviye 0; BIM'den başlayarak sürekli değişmektedir. 2000'li yıllarda şirketler, BIM Seviye 1; de 3D CAD modellemeyi kullanmaya başlamıştır ve dijital veri paylaşımı için CDE (Ortak/İşbirlikçi Geliştirme Ortamı) kullanılmış ancak katılımcı üyeler arasında model paylaşma yeteneği gelişmemiştir. Seviye 2; BIM dijital dosyaların ve modellerin iş birliği, paylaşımı ve ortak dosya formatları IFC (Endüstri Temel Sınıflarının) kullanımı ile karakterize edilmiştir. Seviye 3; BIM, paydaşlar arasındaki iş birliğine odaklanılarak entegre edilmiştir ve inşaatın yaşam döngüsü boyunca iş birliğini sağlamak için merkezi bir bulut tabanlı ortamda depolanmaktadır. Günümüzde, tesis tasarımı, inşaatı ve bilgi aktarımı sırasında BIM bina operasyonlarındaki hataları en aza indirmek ve ortadan kaldırmak amacıyla kaynak verimliliğini artırmak için sıklıkla kullanılmaktadır (Celik et al., 2021). Aşağıdaki şekil 3'de BIM olgunluk Düzeyleri diyagramla gösterilmiştir.



Şekil 3 BIM Olgunluk Düzeyleri (Akgün, 2016)

2. BIM Uygulama Alanları

BIM, araçlar ve koordinasyon yazılımları, proje iş akışını her yıl daha yüksek dijitalleşme düzeyine (sanal gerçeklik, yaratıcı tasarım vb.) taşımaktadır. Bir BIM modelinde saklanan büyük ve önceden belirlenmiş bilgiler ulaşılan olgunluk seviyesine bağlı olarak yerleşik ortamdaki fiziksel olayların (yapısal, güneş, termal, insan, tesis yönetimi, vb.) geometrik/geometrik olmayan obje ve bunların iletişim kombinasyonunu içeren açık ve nötr bir format dosyası kullanmaktadır. Hem profesyoneller hem de şirketler tarafından gerekli olan en iyi birlikte çalışabilirliği elde etmek için standart bir protokole sürekli olarak çok sayıda çaba gösterilir. Ancak bazen tasarım ve analiz yazılımı arasında çok fazla yakınsama olduğu görülmektedir. Bunlar genellikle mühendisler, tasarımcılar ve yükleniciler arasında disiplinler arası koordinasyon eksikliğine yol açmaktadır (Guida et al., 2021).

Kullanıcıların proje yaşam döngüsü boyunca bilgileri birleştirmesine ve yeniden kullanmasına olanak tanımaktadır. BIM, bilginin elde edilebilir ve izlenebilir hale getirilebilmesini sağlamak için birçok planlı ve parça yapım projesi dahilinde

tutarlı, koordine ve hesaplanabilir bilgi yönetimi sağlamaktadır. Bu, inşaat sektörünün bilgi işlem ve veri becerisini önemli ölçüde geliştirmektedir (Zhang et al., 2022).

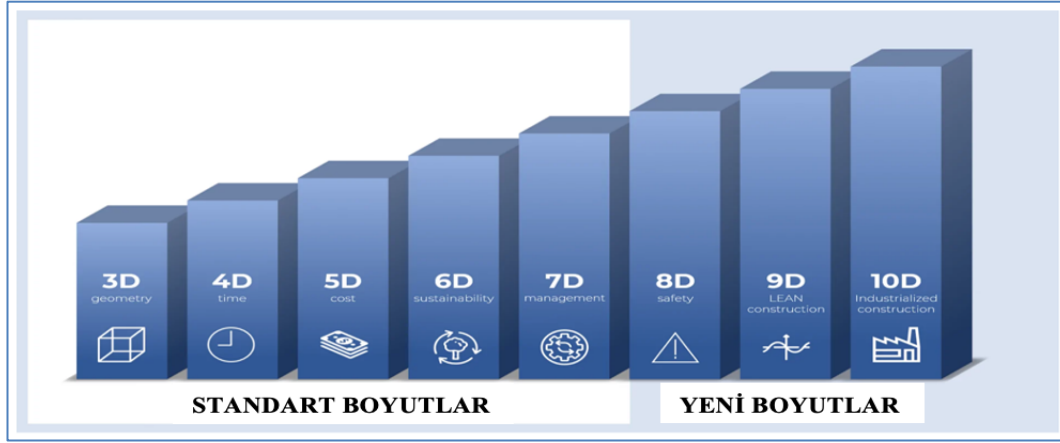
BIM, şehirlere görüntü taramaya dayalı dijital modeller sağlamakta ve çeşitli bulut platformlarını, elektrik hattını, trafo merkezini, kanalizasyon sistemini, su temini ve drenaj sistemini, acil durum sistemlerini, Wi-Fi (Kablosuz Bağlantı), otoyolları, trafik kontrol sistemleri ve şehir içinde birbirine bağlanabilen diğer yerleri kapsayan dijital modelleri sağlayacaktır. İnternet çağında, arama teknolojisi bir şeyleri keşfetmemizi, anlamamızı ve tanımamızı kolaylaştırmaktadır. Gelecekte, dronlar, kendi kendine giden arabalar ve sensörler, web tarayıcılarının mevcut çalışmalarının yerini alacaktır. Bununla birlikte, mevcut BIM modeli tasarımı ve BIM iş birliği yeteneklerinin inşası henüz olgunlaşmamıştır ve bilgi alışverişinde kayıp sorunu oluşmaktadır. Dijital ikizler, büyük bina verilerini etkili bir şekilde işleyebilmekte ve modelin olası eksikliklerini önleyebilmektedir. Bu nedenle, dijital ikizler çerçevesi altında BIM modelini incelemek bu iki teknolojinin pratik uygulaması için büyük önem taşımaktadır (Wang et al., 2022).

3. BIM'in Kullanımı ve Boyutları

BIM, tesisin yaşam döngüsü boyunca planlama, inşaat ve bakımı geliştirmek amacıyla bina bilgilerinin doğru ve birlikte çalışabilen kaydını tutmak için kullanılan bir platformdur. Özellikle BIM, tasarım ve inşaat aşamasında hataları önleyerek maliyeti azaltmak için bina spesifikasyonu, program, maliyet tahmini ve bakım yönetimi (yani 4D, 5D ve 6D) ile ilgili ek verilerle binanın 3D CAD modelini yerleştirmek için geliştirilmiştir. Gerçek zamanlı veri girişlerinden (örn. Sensörlerden ve IoT cihazlarından) BIM faydalarının sağlanması için çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalar, BIM'i zaten uygulamış olan veya BIM belgelerini oluşturma işlemini ve maliyetine fayda sağlayacaktır (Oyarhossein, 2021).

BIM, ürünle ilgili bilgilerle sınırlı değildir. Süreçle ilgili bilgilerle bağlantılı 3D model öğeleri (örn. program, maliyet, sürdürülebilirlik ve tesis yönetimi), 3D modelin (örn. 4D, 5D) ötesinde görselleştirme geliştirmektedir. BIM, 3D görselleştirmeyi kullanarak anlayışı, kaliteyi, koordinasyonu ve genel yönetim verimliliğini iyileştirmiştir. 3D modelleri, inşaat işlemlerinde daha iyi fiziksel gerçekliğe sahip olan 2D çizimlere göre daha ayrıntılı bilgiler sağlamaktadır. BIM, programları modele entegre ederek 4D kontrollerini yaparak maliyeti, programı ve 3D model entegrasyonunu ayarlayarak 5D kontrolleri için ortamı oluşturmaktadır. BIM

yaklaşımı ürün yaşam döngüsü boyunca belirli bir dereceye kadar uygulansa da 4D ve 5D proje kontrollerinin uygulanması geleneksel olarak iş birliği ve paydaş katılımının maksimum düzeyde olduğu ön yapı ve inşaat aşamalarıyla sınırlı kalmaktadır (Barbarosoglu and Milner, t.y.) Aşağıdaki şekil 4’de BIM boyutları gösterilmiştir.



Şekil 4 BIM Boyutları (buildext.com, 2023)

4. Şirketlerin BIM Sistemine Entegrasyonu

BIM inşaat sektöründeki teknoloji, süreç ve politikaların bir kombinasyonu olan dijital yeniliğin mevcut ifadesidir. BIM varlıkların oluşturulma ve çalıştırılma biçimini değiştirmektedir. BIM’in farklı kullanımları, tasarımcıların, yüklenicilerin, mühendisliğin ve tesis yöneticilerinin tasarım, yapı ve varlıkların işleyişidir. İnşaat sektörü birçok zorlukla karşı karşıya kalmaktadır. Bunlar arasında düşük üretkenlik, düşük düzenleme ve uyumluluk, güven eksikliği, yetersiz iş birliği, bilgi paylaşımı ve kötü ödeme uygulamalarıdır (Li et al., 2019).

BIM, inşaat sektöründe endüstri iş birliği faaliyetlerini kolaylaştırmak için iyi bir platform olarak görülmektedir. Bu nedenle, giderek daha fazla inşaat şirketi BIM’i müşterilerin ihtiyaçlarını karşılamak için projelerde kullanmanın önemine değer vermektedir. BIM, bilgi şeffaflığını artırır ve proje sırasında atıkları azaltmak ve gelecekte hataları önlemek için önemli olan bir projenin erken inşasında paydaşlar arasında iş birliği çalışmalarını kolaylaştırmanın yararlarını göstermektedir. BIM modelinde yer alan bir inşaat projesinin bilgileri; coğrafi bilgiler, yapı bileşeni ürün malzemelerinin miktarı ve özellikleri, anket çalışmaları, elektrik çizimleri, boru hattı bilgileri vb. çeşitli olabilmektedir. Paydaşların bilgi alışverişinin amacını elde etmek için BIM yazılımı yoluyla yapı bilgilerini oluşturmak ve inşaat süreçlerini takip etmelerine olanak sağlamaktır. Geleneksel 2D CAD çalışma modelinde bilgilerin iletişimi herhangi bir proje aşamasında paydaşlar arasında çok net olmayabilir ve bu

da proje ilerlemesini kolaylıkla yavaşlatabilir dolayısıyla inşaat, işletim ve bakım sürecinde gereksiz hatalara neden olabilmektedir. BIM tabanlı inşaat projelerinin yapı bilgileri inşaat yönetimi personelinin sorunları bulmasını ve çözmesini kolaylaştırmak ve ortaya çıkan riskleri azaltmak amacıyla her aşamada şeffaf bir şekilde paylaşılabilir (Kaewunruen et al., 2020).

İnşaat sektörü en büyük veri miktarına ve en büyük ölçeğe sahiptir. Her zaman popüler hale gelen büyük veri kavramları ve sürekli gelişen BIM, inşaat endüstrisinin büyük veri çağının gelişini kaçınılmaz olarak teşvik edecektir. BIM, bilgisayarda sanal bina projeleri için 3D modeller kurmaktadır. Eşzamanlı olarak BIM, gerçek durumla eksiksiz ve tutarlı bir proje bilgi veri tabanı ile kurulan modelleri sağlamak için dijital teknikleri uygulamaktadır. Bu bilgi veri tabanı, geometrik bilgileri, profesyonel nitelikleri, bina nesnelere açıklayan durum bilgilerini ve bileşen olmayan nesnelere durum bilgilerini içermektedir. BIM, bina projelerinin verilerini ve bilgilerini kullanarak bina modelleri oluşturur ve binaların gerçek bilgilerini dijital bilgi simülasyonu ile simüle etmektedir. Binalar teslim edildikten sonra işletme ve bakım, inşaat sürecinde toplanan verilere, bakım sırasında üretilen verilere ve BIM modellerindeki geometrik verilere bağlıdır. Akıllı inşaat platformları tarafından yönetilen "akıllı şantiyeler" hakkındaki veriler BIM modellerinden gelmektedir. BIM modellerinin doğruluğu, "akıllı şantiyelerin" gelişimini belirlemektedir (Wang et al., 2022).

Yüksek düzeyde paydaş katılımı ve bina teknolojilerinin uygulanması, bireyler ve teknoloji arasında iş birliği sağlamak için entegre bir yaklaşım gerektirmektedir. BIM, proje verilerini tasarım ve veri yönetimi, simülasyonlar ve proje çizelgeleme gibi birden fazla inşaat teknolojisi ekosistemi kullanım durumu için kullanılabilir hale getiren yakınsak bir çözüm sunmaktadır. BIM'in zorluğu, roller ve sorumluluklardaki benzerlik nedeniyle sorumlulukları ve hakları belirlemektir. Diğer konular arasında fikri mülkiyet güvenliği, risk tahsisi, emniyet, güvenlik ve üçüncü taraflara güven ve teknoloji araçlarının mevcudiyeti yer almaktadır (Celik et al., 2021).

5. BIM Standartları

Bir varlığın farklı yaşam döngüleri boyunca gelişimi ve uygulanması birden fazla ülke standardı ve düzenleme kuruluşu tarafından geliştirilen bir dizi standart tarafından desteklenmektedir. BSI (Britanyalı/İngiliz Standartları Enstitüsü), özellikle tasarım, inşaat ve çalışma dahil olmak üzere bireysel yaşam döngüsü aşamalarına

odaklanan BIM ile ilgili kapsamlı bir standartlar dizisi geliştirmiştir. BSI, BIM ile ilgili standartlar, BIM bilgi yönetimi süreçleri bağlamında bilgilerin nasıl tanımlanması, toplanması, değiştirilmesi, depolanması, kullanılması ve atılması gerektiğine dair temel oluşturmaktadır. Standartlar genellikle bireysel yaşam döngüleri ve disiplinler için geliştirilmiştir (Lu et al., 2020).

OpenBIM; yaşam boyu verilerin açıklığını, güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini iyileştirmek ve tüm paydaşlar arasında esnek iş birliği sağlamak için açık standartlara ve iş akışlarına dayalı BIM kullanımını göstermektedir (Moretti et al., 2020). BIM ve varlık yönetiminin uygulanmasını desteklemek için farklı paydaşlar arasında geometrik ve geometrik olmayan bilgi alışverişini O&M (İşletme ve Bakım) aşamasında standartlaştırmak için temel bir ihtiyaç vardır ve bu gereksinim OpenBIM adı verilen bir kavramla sonuçlanmıştır. OpenBIM, BIM yazma ve doğrulama araçları arasında bilgi alışverişi için bir dizi açık kaynaklı veri standardıdır. En önemlisi BuildingSmart, BIM ile ilgili bilgi alışverişini destekleyen ve yazılım geliştiriciler tarafından yaygın bir şekilde benimsenen açık kaynaklı veri formatı IFC'yi (Endüstri Temel Sınıfları) geliştirmede yardımcı olmuştur (Lu et al., 2020). OpenBIM, BIM'in birlikte çalışabilirliği ve veri alışverişi için genellikle IFC (açık bir BIM standardı) kullanılmaktadır (Wu et al., 2022).

IFC standardı; sektörün birlikte çalışabilirlik sorunuyla başa çıkmak için tasarlanmıştır (Boje et al., 2020). Bu standart dinamik veri güncellemesini zayıf bir şekilde destekleyen statik bir veri formatı olduğu ve IFC şeması sürekli olarak gelişmesine rağmen farklı sensörleri tanımlamak için zengin bir dağarcığa sahip olmadığı için en önemli zorluk birlikte çalışabilirliktir (Chen et al., 2021). IFC şeması, birlikte çalışabilirlik, paylaşım, iş birliği ve sınıflandırma için etkili bir araç olarak geniş çapta incelenen nesne odaklı bir açık standarttır. IFC şeması kapsamlı ve karmaşıktır dolayısıyla kullanımı basit yazılımla birlikte çalışabilirlik iş akışlarıyla ve BIM modelinin temel bilgilerinin görselleştirilmesine sınırlanmıştır. Bununla birlikte, IFC yalnızca geometri gösterimi için değil aynı zamanda semantik veri zenginleştirilmesi için de iyi bir destek sunmaktadır (Moretti et al., 2020). BIM'e en çok uygulanan yaklaşımlardan biri IFC'dir. IFC, bina bileşenlerinin geometrisi ve kullanılan ilgili özellikler için açık veri modeli spesifikasyonlarıdır; böylece insanlar CAD kullanırken verileri bir yazılım programından diğerine aktarabilirler (Alshammari et al., 2021). IFC, binanın fizibilite ve tasarımından inşaat, operasyon ve

değişimlere kadar binayla ilgili tüm bilgileri görüntülemeyi amaçlamaktadır. IFC dosyalarını yerel BIM modelinde kullanabilir ve dosyaları alıcılara iletebilirler. IFC modelini bir yazılımdan dışa aktarma ve içe aktarma sırasında bazı bilgiler eksik veya takip edilemez olabilmektedir. Manuel yeniden tanımlama verileri zaman alır ve insan hatasına karşı hassastır. Doğrudan IFC dosya desteğiyle bile IFC dosyalarının içe/dışa aktarılmasında (özellikle algılanmayanlar) eksik bilgiler önemli bir sorun olabilmektedir. Yazılım geliştiriciler bilgi kaybı sorununu gidermek için dosya değişiminden önce olası bilgi kaybını manuel veya yarı otomatik olarak arayabilir ve dosya değişimi sırasında anonim bilgilerin kaybolmasını önleyebilir/azaltabilir (Zhao et al., 2021). BIM tasarımının nihai sonucu olan dijital ikiz verilerin IFC formatında dışa aktarılması, tasarım verilerinin kayıp veya bozulma olmadan tek bir ortak kanal aracılığıyla paylaşılmasına izin veren tümünü kapsayan yapılandırılmış ve sertifikalı bir bilgi modelini temsil etmektedir (Flamini et al., 2022). Bugün BIM projeleri için hem ticari hem de açık kaynaklı çok sayıda yazılım modelleyici vardır. Nesne yönelimli olduklarından genellikle nesnelere ilgili veritabanı tablolarına sahip olma olasılığı vardır ancak genel olarak sundukları standart arayüz ve veri modeli IFC dosyasıdır (Rosati et al., 2020).

COBie; Yapı İşlemleri Yapı Bilgi Alışverişi (Cobie), Birleşik Krallık hükümetinin BIM modeli ve PDF belgelerinin yanı sıra BIM ile ilgili bilgiler için seçtiği bilgi alışverişi şemasıdır. Amaç, bir varlığın tüm yaşam döngüsü boyunca bilgi alışverişi için yapılandırılmış bir yaklaşım oluşturmaktır. Cobie, birden fazla paydaşın (tesis yöneticisi, tedarikçi vb.) doldurup önceden belirlenmiş bir zamanda veya etkinlik kilometre taşlarında varlık sahibiyle takas edebileceği yapılandırılmış bir elektronik tablodur. Cobie'de yakalanan O&M bilgileri Model Görünümü Tanımı adı verilen IFC veri modelinin bir alt kümesidir. Cobie, bir varlığın yaşam döngüsü içinde birçok paydaşın bilgi alışverişi için basit ve kullanıcı dostu bir yaklaşım (elektronik tablolar aracılığıyla) sağlarken, merkezi bir doğrulama süreci olarak sınırlanmıştır ve bilgilerin merkezi olarak kontrol edilen bir veri tabanı/platform ile karşılaştırıldığında birden fazla elektronik tablo içinde kaybolma riski vardır. Ayrıca, IFC ve Cobie kullanan FM (Tesis Yönetimi) için gereken veri varlıkları, türleri ve parametreleri hala sınırlıdır. O&M aşamasında daha karmaşık veri türlerine ihtiyaç vardır (Lu et al., 2020). COBie genellikle BIM tasarım yazılımından Tesis Yönetimi, Operasyonlar ve Bakım yazılımına kolayca aktarılabilen bir veri formatına yönetilebilir varlıklar için

veri vermek üzere kullanılan bir takas biçimidir. COBie'nin ekipman özellik listeleri, garantiler, ürün veri sayfaları, bakım programları ve kullanım ömrü gibi önemli proje verileridir. Bu bilgiler tesisin işletimi ve bakımına yardımcı olmak için çok önemlidir. Geleneksel projelerde, teknik resimlerde ve teknik özelliklerde yer alan yapı bilgileridir. Bu belgeler normalde kâğıt veya PDF biçiminde işlenerek organize değildir, tesis yönetimi tarafından kullanılması zordur ve bazen oluşturulduktan sonra bina durumunu yansıtmaz. BIM yazılımı tarafından dışa aktarılan COBie verileri gibi düzenlenmiş bir veri biçimi, çizimlerde herhangi bir değişiklik yaparken otomatik olarak değişen, son yapılan çizimleri yansıtan ve tesis yönetimi tarafından kolayca kullanılabilen güncel bilgiler içermektedir. Tasarım aşamasında COBie verileri, Autodesk Revit gibi tasarım yazılımının programlarında toplanabilir ve yakalanabilir. Revit gibi BIM yazılımı dışa aktarılan COBie verilerinin çizimlerle eşleştiğinden emin olunmalıdır. Yükleniciler, COBie'yi organize veri yapısı nedeniyle inşaat gönderimlerinin alternatif bir yolu olarak görmektedir. COBie'nin en önemli avantajlarından biri UniFormat, Omniclas ve MasterFormat gibi Yapı Özellikleri Enstitüleri tarafından sağlanan bir sınıflandırma sistemi kullanarak verileri düzenleyebilmektir. COBie, CMMS (Bilgisayarla Bakım Yönetim Sistemleri) yazılımına veya popüler bir IFC formatı olan Microsoft Excel elektronik tablo formatına aktararak kurumun yöneticilerini kullanabilmektedir (Sabbagh, t.y).

6. BIM'in Yaşam Döngüsü

BIM varlık yaşam döngüsünün merkezindedir. Birçok paydaş BIM yaşam döngüsü boyunca dağıtılmaktadır. BIM'in işi paydaşlardan alınan bilgileri bir araya getirmek ve müşteri ile diğerleri için varlık sonucunu iyileştirmek üzere paylaşmaktır (Kaewunruen and Lian, 2019). Ürün/proje yaşam döngüsü yönetimi, bilgi yoğun bir üretim ortamında sağlam süreçleri geliştirmek için 21. yüzyılda ortaya çıkmıştır. Bir projenin yaşam döngüsü, inşaat projelerinin başlatılması, tasarlanması, yürütülmesi, işletilmesi ve bakımı ile yıkımını içermektedir. Proje yaşam döngüsü yönetimi araştırmasının temel amacı; üretim öncesi, üretim ve üretim sonrası süreçleri iyileştirmek ve geliştirmektir. Tasarımdan bakıma, operasyondan geri dönüşüme, lojistikten izlemeye kadar proje yaşam döngüsünü yönetmek için bütüncül bir bakış açısı gereklidir. Proje yaşam döngüsü boyunca meydana gelen aşırı bir veri vardır. Bu nedenle, tasarım, üretim, satın alma, kaynak yönetimi, lojistik, hizmet, bakım ve diğer veri kaynaklarından toplanan büyük veriler, tahmini ve önleyici bilgi akışı açısından

bina yaşam döngüsü yönetimi süreçlerini iyileştirmek için büyük bir potansiyele sahiptir. Büyük verinin kullanımı, yüksek kalite, iyileştirilmiş doğruluk, öngörülebilir süreçler, yüksek performans, iyileştirilmiş bilgi ile sonuçlanan gerçek zamanlı veri kullanımı ile tasarım, üretim, işletme ve bakımda verimliliği artırmada inşaat şirketlerinin rekabet avantajının temeli olarak gösterilmektedir (Ozturk, 2021).

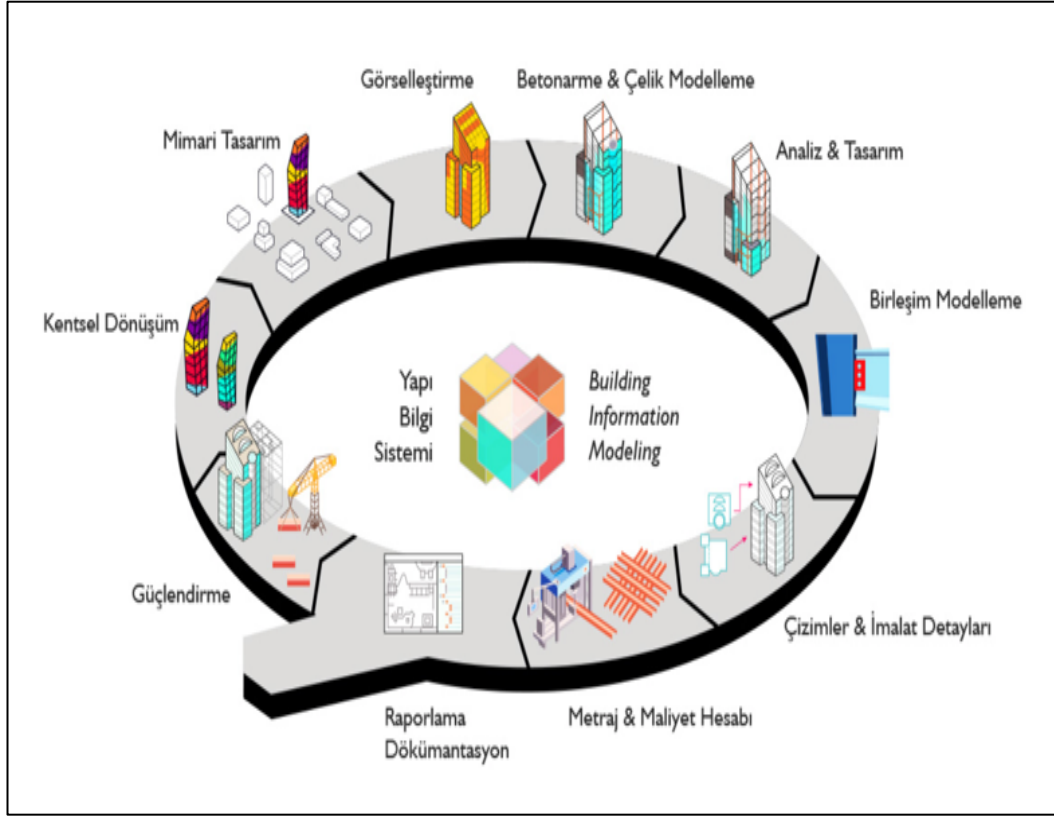
Bir inşaat mühendisliği projesinin tüm yaşam döngüsü boyunca birleşik ve dijital bir şekilde bilgi toplama, yönetme ve paylaşma için dijital iş birliği alanları (yani proje sunucuları, bulut tabanlı sistemler) sağlamaktadır. Diğer bir deyişle, BIM, proje yürütme sırasında veri açısından zengin nesnelere, girdilerden, belgelerden, sensörlerden, bina yönetim araçlarından ve diğerlerinden toplanan büyük verileri depolamak için bir veri havuzu olarak görülmektedir. BIM'in benimsenmesi büyüdükçe BIM verilerinin miktarı katlanarak artacak ve bu da "büyük veri"nin bazı özelliklerine yol açacaktır. BIM veri dosyalarının onlarca veya yüzlerce gigabaytlık büyük bir boyuta ulaşması oldukça kolay olmaktadır (Pan and Zhang, 2021).

İnşaat dünyasına uygulanan referans metodoloji olarak BIM, büyük yapıların ve altyapıların tasarımında ve yönetiminde önemli değişikliklere yol açmaktadır. Ancak BIM yaklaşımı bir yapının tüm yaşam döngüsünü yönetmek için gerekli olsa da günümüzde bu yöntem tasarım aşamasının dışında hala nadiren benimsenmektedir. Bu binaların yaşam döngüsünün her aşamasının yönetimi doğru ön planlamaya ihtiyaç duyduğu için büyük bir hata teşkil etmektedir. Bir inşaatın yaşam döngüsünün en karmaşık ve önemli aşamalarından biri de bakımıdır ve binanın veya inşaatların güvenli bir şekilde temsil eden izleme aşamasıdır (Scianna et al., 2022). Yaşam döngüsü dört aşamada gerçekleşir:

- **Ön tasarım veya geliştirme;** projenin sözleşmeye dayalı olarak gözden geçirilmesine izin vermektedir.
- **Tasarım;** yapının hassas bölümlerinin tasarımını gözden geçirmektir. BIM, operatörün gelecekteki işi daha iyi görselleştirmesine (3D olarak) ve doğru zamanda yorum yapmasına olanak tanımaktadır.
- **İnşaat;** projenin ilerleyişini izlemek ve muhtemelen bir uygunsuzluk veya imalatçıdan gelen değişiklik talebi hakkında yorum yapmayı sağlamaktadır.
- **Operasyonlar ve bakım;** BIM, bakım operasyonları ekibinin, tüm dokümantasyonu dosyalama, yoğun bakım müdahalelerini ve trafikle ara yüzleri modelleme (Trafik

altında çalışmanın simülasyonu) yardımı ile operatörleri simülatörler aracılığıyla eğiterek hız ve güvenliği artırmanın yanı sıra; yapı üzerinde inceleme ve çalışma geçmişi oluşturmasına yardımcı olacaktır (Tchana et al., 2019).

Aşağıdaki şekil 5’de BIM’in yaşam döngüsü gösterilmiştir.



Şekil 5 BIM'in Yaşam Döngüsü (idecad.com.tr, 2023)

İşletim ve bakım (O&M) evresi; son yıllarda binaların artan karmaşıklığıyla birlikte O&M yönetimini desteklemek için binalara ve iç mekân faaliyetlerine ilişkin bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, mevcut bir binanın işletilmesinde ve bakımında güncel bilgilere verimli bir şekilde erişmek hayati önem taşımaktadır. Bu yüzden, bilgilerin olduğu gibi bütünlüğünü ve kapsamlılığını korumak, İşletme ve Bakım aşamasındaki en önemli görevlerden biridir. İşletme ve Bakım aşamasında binaları rahat ve etkili bir şekilde modellemeyi desteklemek için etkili dijital eşleştirme yaklaşımlarına acil bir ihtiyaç vardır (Lu et al., 2020). O&M aşamasında BIM, mevcut binalar ve altyapı gibi çeşitli faaliyetleri destekleyen bir bilgi kaynağı ve depo olarak kullanılabilir. BIM, tasarım ve inşaat aşamalarında başarıyla benimsenmiştir (Qiuchen Lu et al., 2019).

Varlık Yönetimi; BIM'nin varlık yönetimi dahilinde benimsenmesi hâlâ sınırlıdır. İnşaat sonrası aşamada BIM binaların dijital temsili olarak varlık yönetimi için kullanılabilir. Somut tesislerdeki değişikliklerin dijital modelinde kaydedilmesine ve güncellenmesine izin verir. BIM, daha doğru ve daha zengin veriler sağlarken bina yönetimini ve işletimini hızlandırmaktadır (Visartsakul and Damrianant, 2023). Varlık sahiplerine dijital varlıkların ek sahipleri olma fırsatı tanınırken kavramsal yaklaşımlar ve dijital varlık yönetimi ihtiyacı da artmaktadır. AECO (Mimari, Mühendislik, İnşaat ve İşletme) sektörlerinde varlık yönetimi için BIM uygulamasının giderek artmasıyla birlikte BIM özellikli varlık yönetimi hem araştırma hem de uygulamaya giderek daha fazla ilgi çekmektedir. Tesislerin geliştirilmesi ve üretilmesiyle ilgili sorun, tasarlandığı gibi inşa edilen tesisler veya karmaşık teknik sistemler arasındaki farkla ilgilidir. Dijital ekonominin gelişmesiyle birlikte varlık yönetiminin dijitalleşme ihtiyacı da artmaktadır. Mevcut bilgi teknolojilerinin analizi, tasarım aşamasında ana maliyetleri yoğunlaştırarak bir varlığın üretim ve işletim maliyetini azaltma olasılığının olduğunu göstermektedir (Bolshakov et al., 2020).

Tesis Yönetimi (FM); BIM teknolojisinin tesis yönetiminde kullanılması, kullanım ömrü maliyetlerinin kaybedilmesini önlemektedir (Kaewunruen and Xu, 2018). Tesis yönetimi; insanları, yeri ve süreci entegre ederek temel hizmetleri sunan temel işletmeleri destekleyen bir yönetim işlevidir. Tesis yönetimi bilgiye bağlıdır. Yapılı ortamdaki bilgi yönetimi uygulaması aşamalı olarak BIM'e dayanmaktadır. İnşaat verilerinin yapılandırılması, sağlanması ve işlenmesi için uluslararası standardizasyon mevcut olsa da veri uyumunun olmaması inşaat sektörünün diğer sektörlerle kıyasla düşük verimliliği ve etkinliği için bir faktör olabilmektedir (Wildenauer et al., 2022). BIM, belirli FM alanlarında yaygın olarak uygulanmaktadır: (1) gerçek zamanlı görselleştirme; (2) karar vermeyi, iletişimi ve ilerlemeyi izlemeyi desteklemek; (3) enerji performansı yönetimi; (4) iç ortam izleme; (5) iç mekân termal konfor takibi; (6) alan yönetimi ve (7) planlama siparişlerinin, alanın, faaliyetlerin ve emeğin takibinin kolaylaştırılmasıdır. FM endüstrisi, O&M aşamasındaki varlıkları çalıştırma şeklini geliştirebilir ve IoT, tahmine dayalı analiz, Makine Öğrenimi, Yapay Zekâ, GPS (Küresel Konumlandırma Sistemi) ve büyük veri analitiği gibi teknolojilerinden yararlanarak daha az insan gücüyle dijitale geçebilmektedir. Bir binada kablosuz sensör teknolojisi aracılığıyla DT'nin fiziksel dünyaya bağlanması, iç

mekân konfor yönetimi, karbon monoksit seviyeleri, enerji yönetimi ve alan yönetimi gibi yapılı çevre ile ilgili verileri toplamak için kullanılabilir. Endüstri 4.0 ve olarak sağlayan teknolojiler FM yöneticisine ve iş organizasyonuna aşağıdaki şekillerde fayda sağlayabilmektedir:

- Gerçek zamanlı veri yönetimi ve takibi enerjiyi belirli yerlerde kullanarak enerji israfını azaltabilmekte ve CO₂ (Karbondiyoksit) emisyonunu azaltabilmektedir.
- Akıllı sensörler sayesinde akıllı binalarda sorunları önceden çözmek için kestirimci bakım kolaylaşabilmektedir.
- Enerji tüketimi için harcanan maliyet açısından FM faaliyetlerinde toplam maliyet azaltılarak işletmedeki akıllı süreci düzene sokmakta, organizasyon ve kaynak israfının azaltılması sağlanmaktadır.
- FM profesyonellerinin FM sistemlerinin davranışını kolayca simüle edip tahmin edebildiği, İşletme ve Bakım aşamasındaki arızaları önleyebildiği farklı yazılım veri tabanları ve araçlardan veri birlikte çalışabilirliği etkinleştirilmektedir (Zhao et al., 2022).

7. BIM ve GIS Entegrasyonu

Kentsel planlamacılar yıllardır GIS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) verileri ve 3D şehir modelleri gibi dijital modeller kullanmaktaydı. Bir projenin yaşam döngüsü boyunca planlama, inşaat ve yönetim kalitesini desteklemek ve geliştirmek için bir yöntem olarak BIM araçları ve süreçleri oluşturmak kademeli olarak benimsenmektedir. Son birkaç yıl içinde “planlama devrimi” için yararlı kabul edilen birçok kavram hem bilimsel hem de operasyonel alanlarda kullanılmaktadır (Deprêtre et al., 2022). Bilgisayar Destekli Tasarım ve Mühendislik (CAD/CAE) ve GIS teknolojileriyle ilgili inşaat ortamlarında (BIM modelleri) 3D modelleme ve simülasyon için yazılım yetenekleri açısından yapay zekâdaki gelişmelerle birlikte BT'ler (Yapı Teknolojileri) artık bir kentsel projelerde, arazi yönetiminde ve kamu altyapısında yer almaktadır (Ospina-Bohórquez et al., 2022). BIM ve GIS pompalanan depolama güç istasyonunun dijital modelini oluşturmak için kullanılan iki özel içeriktir. Özellikle BIM teknolojisi dijital bilgileri ve mühendislik fiziksel özelliklerinin görsel ifadelerini ve işlevsel özelliklerini koruyan çok boyutlu bir bilgi entegrasyon teknolojisi (Yan et al., 2022).

GIS, şehir düzeyindeki verileri işlemede doğal bir avantaja sahiptir ve veri tabanlı hiyerarşik işleme mantığı donanım hesaplama miktarını önemli ölçüde azaltabilmektedir. GIS, hesaplamalı sonuçlar elde etmek için mekansal analiz araçlarını ve modelleme yöntemlerini kullanarak jeo-uzamsal ve öznelik verilerini entegre ederek çevresel ve doğal kaynakları analiz eder ve görselleştirir. GIS, çok kaynaklı verileri etkili bir şekilde yönetmek için güçlü bir veri tabanına, hesaplama yetenekleri ve kentsel alanlarda mekânsal ve nitelik bilgilerinin daha iyi kullanılmasını sağlamaktadır. Mekânsal analiz, akıllı şehirlerde GIS uygulamasının özüdür ve yöntemleri arasında mekânsal dağılım, mekânsal morfoloji, mekânsal uzaklık, mekânsal konum ve topolojik ilişki analizleri yer almaktadır. Çünkü GIS, büyük ölçekli mekânsal bilgileri işleyebilmekte ve hiyerarşik olarak mekânsal analizler gerçekleştirebilmekte böylece kentsel uygulamalardaki BIM eksikliğini giderebilmektedir. Teknolojik gelişmelerle birlikte IoT teknolojisi ile birleşen GIS ve BIM entegrasyonu şantiyelerde güvenlik kazalarının oluşumunu önemli ölçüde azaltmayı, daha bilimsel, kullanışlı ve güvenli inşaat yönetimi elde etmeyi ve ayrıca inşaat hızını önemli ölçüde artırmayı sağlamaktadır. GIS'in temel işlevlerinden biri navigasyon işlevidir. Navigasyonun inşaat alanına girmesi bina inşaatı sırasında malzeme taşıma maliyetini azaltabilmektedir. AEC (Mimari, Mühendislik ve İnşaat) endüstrisinin ana yönü mimari tasarımıdır. Bu açıdan GIS ve BIM entegrasyon teknolojisi, binaların atık üretimini ve bina enerji tüketimini azaltmasına, bina yeri seçimini optimize etmesine, mimari tasarım planlarını iyileştirmesine ve mimari tasarım alanında önemli bir rol oynamasına yardımcı olabilmektedir (Xia et al., 2022).

8. BIM'in AEC Sektörüne Etkisi

AEC sektörü birden fazla ulusal ve dahili sürdürülebilirlik hedefine ulaşmak için son yıllarda mevcut binanın enerji rehabilitasyonu ile ilgili artan bir endişe ortaya koymaktadır. Aynı zamanda BIM metodolojisinin etkisi ve önemi tüm inşaat sektöründe giderek artmakta ve bu da onun merkezi parçalarından biri haline getirmektedir (Martins et al., t.y.). BIM, yerlerin fiziksel ve işlevsel özelliklerinin dijital temsillerinin oluşturulmasını ve yönetimini içeren bir stratejidir. BIM'in geliştirilmesini sağlayan çeşitli araçlar ve teknolojiler mevcuttur. Su, elektrik, gaz, yollar, köprüler, limanlar, demiryolları ve havaalanları gibi çeşitli fiziksel altyapıların planlanması, tasarımı, inşası, işletilmesi ve bakımı için güncel BIM yazılımları

kullanılmaktadır. Bu kapsamda inşaat sektörünün mimari, bina ve verilerini tanımlamak için IFC veri modeli kullanılmaktadır (Alvarez et al., 2021).

AEC sektörlerinde faaliyet gösteren kişilerin yakın iş birliği yapılarak iletişim kanallarının daha güvenli bir şekilde yapılması gerekmektedir. AEC sektörü bilgi aktarmak için değişim dosyalarını kullanmaktadır. Kullanıcıların dosyaları değiştirirken güncelleme yapabilmesini sağladığı için inşaat sektöründe BIM verilerinin kullanımı oldukça iyi bir şekilde belirlenmiştir. AEC-FM sektöründe BIM kullanımı dijitalleşmeyi etkili bir şekilde dönüştürmüştür. IFC kullanılarak tasarım ve inşaat süreçlerinde BIM oluşturmak ve yönetmek böylece avantajlar sağlamak mümkündür (Alshammari et al., 2021). BIM ve gelişmekte olan teknolojiler AEC alanındaki bilgilerin oluşturulma, depolanma ve paydaşlar arasında değiş tokuş etme biçimini sürekli olarak değiştirmektedir. Araştırmalar BIM'nin ilerlemesinin sürekli olarak gelişen ve birbiriyle bağlantılı bir dünyada insanların, süreçlerin ve gelişen teknolojilerin titiz bir şekilde değerlendirilmesine bağlı olduğunu göstermiştir. AEC'nin teknolojik gelişmelerden hiç şüphesiz yararlanmasına rağmen sektörün verimlilik oranları hala sektördeki en düşük seviyeler arasında yer almaktadır. Dahası, inşaat sektörü küresel ısınma ve iklim değişikliğine katkıda bulunarak daha akıllı bir ortam ve dünya çapında daha kararlı enerji ve karbon emisyon programları için giderek artan bir zorluğa yol açmaktadır. BIM, IoT (Nesnelerin İnterneti) ve AI (Yapay Zekâ) gelişmesi ve entegrasyonu, enerji verimliliğini artırıp işletme maliyetlerini azaltmayı talep etmektedir. Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanması AEC endüstri uygulamalarında devrim yaratacak potansiyele sahip bir de itici güçtür. Bu ilişkide BIM, oluşturulan varlıkların yaşam döngüsü yönetimini dahil etmek için kullanılmıştır ancak mevcut BIM düzeyi IoT entegrasyonu ile tamamen uyumlu değildir. Kontrol sistemleri, sensör ağları entegrasyonu, sosyal sistemler ve bina kapsamının dışındaki kentsel eşyalar gibi konulardaki anlamsız eksikliğine gelince BIM nispeten daha iyi olduğunu kanıtlamaktadır. Bu nedenle, dinamik verileri farklı düzeylerde işleyebilen kapsamlı ve ölçeklenebilir bir insan yaklaşımına ihtiyaç duymaktadır (Relekar et al., 2021).

AECO endüstrisindeki birçok inşaat projesi karmaşık, çok disiplinli ve çok paydaşlı iş birliklerini ve bilgi alışverişlerini içermektedir. BIM, tüm varlık veri tabanları için dijital bina modelleri veya sivil altyapı oluşturmak amacıyla bir çerçeve olarak kullanılabilen ve sorunsuz dijital veri alışverişi sağlamaktadır. BIM, son on

yıldır bilgi merkezi olarak ve AECO sektöründe giderek daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. BIM, bütünlük oluşturma, sanal prototip oluşturma, modelleme, dağıtılmış erişim, depolama ve bina veri bakımından kullanılmaktadır. BIM'deki zengin veri insanların bir binayı tasarlaması, bakımını ve işlemesi için yepyeni bir yol sunmaktadır (Zhao et al., 2021).

BIM, AEC-FM endüstrisinde gelişerek adım adım dijitalleştiriminin belirgin bir şekilde değişmesine neden olmuştur. IFC ile BIM tasarım ve inşaat aşamalarında oluşturulup yönetilebilir ve böylece önemli endüstriyel gelişmelere olanak sağlanmaktadır (Alshammari et al., 2021). BIM, AEC endüstrisine yenilikler getirmiş ve yeni vizyonlar sunmuştur. Geleneksel AEC süreçlerini daha verimli iş akışına ve proje paydaşları arasında iyileştirilmiş iş birliğine dönüştürmüştür. İlk BIM aşamasında, standartlar ve yönergeler oluşturulmadan önce endüstri uygulamasında BIM'in benimsenmesinin önünde çeşitli engeller ve zorluklar vardır. Bunlar birlikte çalışabilirlik konularını ve süreçle ilgili sözleşme ve organizasyonel engelleri içermektedir. Bu sorunları çözmek için BIM standartları ve protokolleri BIM'in pratik olarak benimsenmesini teşvik etmek için hükümet ve ona bağlı kuruluşlar tarafından yayınlanmış ve desteklenmiştir (Visartsakul and Damrianant, 2023). AEC dijitalleşmesinin sonuçları ümit verici olsa da sektör genelinde BIM'in benimsenmesi aslında bu yeni çıkan dijital bağlamda ortaya çıkan ek siber güvenlik tehditleriyle birlikte bazı sınırlamalar göstermiştir. Yeni dijital teknolojinin ortaya çıkışı dijital icatlar için fırsatlar sağlar ancak BIM ile ağ tabanlı veri paylaşımı ve ortak veri ortamı sektörü potansiyel siber-fiziksel saldırılara karşı savunmasız hale getirmektedir (Celik et al., 2021).

9. BIM Enerji Modeli

Avrupa'nın 2050 yılına kadar temel hedefleri arasında mevcut binaları daha az enerji tüketecek şekilde getirmek daha az CO₂ yaymak ve sağlıksız evlerde yaşayan insanların konforunu artırmak yer almaktadır. Binaları yenileme ve yeniden kullanma uygulamalarını canlandırmak gerekmektedir. Ancak yenileme kalitesini artırmak, inşaat evresinin süresini kısaltmak, kullanıcı üzerindeki etkiyi en aza indirmek ve maliyetlerin garanti altına alınması gibi sorunların ele alınması gerekmektedir. Bina yaşam döngüsü boyunca daha düzenli ve yapılandırılmış veri toplama ve yönetimi ilgili aktörler arasında daha iyi iletişimle test ve araştırma yöntemlerinin uygulanmasını kolaylaştırması sayesinde veri ve bilgi alışverişinde yapılan

geliştirmeler dijital araçlardan elde edilen faydalardan bazılarıdır. Verimsizliğin neden olduğu zaman kaybı ve sonuç olarak para israfı sınırlanır ve dijitalleşme ile azaltılmaktadır. Böylece kaynaklar daha verimli ve sorumlu bir şekilde kullanılarak elde edilmektedir (Daniotti et al., 2022).

Binalardaki enerji tüketiminin büyük bir kısmı bina sakinlerinin termal tatminini sağlamak için mahal ısıtma/soğutma ile ilgilidir. Son zamanlarda iç mekân termal konfor koşullarının izlenmesi konusu bir binanın performansını değerlendirmek için ilgi konusu haline gelmiştir. Bunun nedeni de doğru, gerçek zamanlı, görsel olarak zengin, sezgisel ve etkileşimli termal konfor göstergelerinin etkin bir şekilde izlenmesinin, istenen iç ortam koşulları elde edilirken bina enerji kullanımının optimizasyonuna yol açabilmesidir (Shahinmoghdam et al., 2021).

Sürdürülebilir kalkınma fikri popülerlik kazandıkça enerji sıkıntısı sorunu göz ardı edilemez ve enerji tasarrufu da büyük ilgi görmüştür. Şu anda, inşaat sektörünün sürdürülebilir gelişimini ciddi şekilde etkileyecek olan binalarda dünya enerjisinin yaklaşık %30'i tüketilmektedir. Mimarlar açısından yenilenemez enerji tüketimini en aza indirmek ve kullanıcılara sağlıklı bir çalışma ve yaşam alanı sağlamak için sürdürülebilir bir geliştirme stratejisi geliştirilmelidir. Şu anda, enerji tasarrufunun inşası ekonomik kalkınma ile enerji sıkıntısı arasındaki çelişkiyi hafifletmenin en doğrudan ve etkili yolu olarak görülmektedir. BIM teknolojisi pek çok projede yaygın olarak kullanılmakta ve ilgili verileri elde etmenin zorluğundan dolayı mevcut binaların enerji tasarrufu sağlayan güçlendirmesinde kullanımı ihmal edilmektedir. BIM'e tarama yöntemi bu sıkıntılı noktayı çözümlenmektedir (Zhao et al., 2021).

Şu anda, enerji malzemelerinin çoğu çeşitli binaları ve yardımcı tesisleri inşa etmek için kullanılmaktadır. Ancak inşaat maliyeti yüksektir ve enerji tüketimi de çok fazladır. Bu nedenle, binanın enerji tüketimini azaltarak yeşil ve enerji tasarruflu tasarımını elde etmek için BIM kullanmak en önemli öncelik haline gelmektedir. BIM, tasarım yaparken 3D modellerini rahat ve hızlı bir şekilde çizebilir, binanın inşa edilebilirliğini artırabilir, kaynak ve enerji kullanım oranını artırabilir ve binaların sürdürülebilir tasarımına da elverişlidir. Geleneksel teknikler, bina tasarımını tamamladıktan sonra enerji tüketimini analiz etmektedir. Buna karşın BIM, enerji tüketimini tasarımın ilk aşamasında analiz etmek için güçlü uyumluluğa sahip bir 3D model kullanmaktadır. Bu şekilde BIM, yalnızca sürdürülebilir kalkınma kavramını

entegre etmekle kalmaz aynı zamanda tasarım değişikliklerinden kaçınarak enerji tüketimi tasarım gereksinimlerini de azaltmaktadır (Wang et al., 2022).

İnşaat tamamlandıktan sonra oluşturulan BIM modeli ayrıntılı bir enerji analizi için yeterli bilgiyi sağlamaktadır. Bu binanın geometrisi, kat planları, malzemeleri ve elemanların teknik özellikleri hakkında verileri içermektedir. BIM modeli ayrıca ekipman, üniteler ve pompalar gibi bina sistemleri hakkında güvenilir bilgiler sağlayabilmektedir. Geometrik varlığa aktif veriler eklenerek, enerji tüketimi değerlendirmesi için kullanılacak makine tarafından okunabilen bilgiler sağlanmaktadır. Bu kapsamlı BIM belgesi güvenilir ve doğru sonuçlar elde etmek ve bilinçli karar vermeye yardımcı olmak için kullanılabilir. BIM teknolojisinin kamu otoriteleri tarafından mevzuat, tasarım ve inşaat gerekliliklerine teşvik edilmesi ve entegrasyonu onun yaygın olarak benimsendiğini ve yakın gelecekte sürekli olarak iyileştirildiğini göstermektedir. BIM'in merkezi veri havuzlarını kullanması da zamanın verimli kullanılmasını artırabilmektedir. Ayrıca, bina dijital bilgilerinin mevcudiyeti bina sistem performansının gerçek zamanlı olarak izlenmesini mümkün kılarak enerji kullanımının ve işletim değerlerinin değerlendirilmesine yardımcı olabilmektedir. İzleme ekipmanına bağlı olarak çevresel koşulları değerlendirme fırsatı bile sağlayabilmektedir (Spudys et al., 2023).

10. Avantaj ve Dezavantajları

BIM'in Avantajları; inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmakta ve esas olarak bina sistemleri ve bileşenlerine odaklanmaktadır. BIM aracılığıyla uygulama oluşturma, bakım çalışmalarını tahmin etme ve organize etme, enerji yönetimi, sürdürülebilirlik değerlendirmesi ve yaşam döngüsü maliyetleri gibi çeşitli uygulamalarda avantajlar sağlamaktadır (Guida et al., 2021). BIM'in en büyük avantajlarından birinin bir projenin ömrü boyunca bilgi oluşturma, yönetme ve bilgi alışverişi yapma yeteneğidir. Bu amaçla dijital ikizin kullanılması bir avantajdır (Tchana et al., 2019). BIM'nin en büyük avantajlarından bir diğeri de parçalanmak yerine bir proje döngüsü boyunca gereken bilgileri erişilebilir bir şekilde temsil etme yeteneğidir (El Jazzer et al., 2020). BIM'nin diğer avantajları, işlevleri ve 3D CAD modelini bina ve malzeme spesifikasyonu, zaman çizelgesi, maliyet tahmini ve bina bakım yönetimi (yani 4D, 5D ve 6D BIM), tasarım ve inşaat aşamasında hataları önleyerek maliyeti azaltmasıdır (Kit, 2022). BIM inşaat alanındaki gecikmelerin üstesinden gelebileceği, maliyetlerin artabileceği, uygun olmayan koordinasyon ve

iletişim, mühendislik inşaatında kalite ve güvenliği iyileştirebileceği için son yıllarda BIM'nin proje inşa etme konusundaki avantajları giderek daha belirgin hale gelmiştir (Kaewunruen et al., 2020). BIM uygulaması olası tehlikeler ve hafifletme planları geliştirilebilir güncel bilgiler, bina operasyonları ve bakım için zamanında yansıtılabilmektedir (Kaewunruen and Xu, 2018). Avantajları arasında daha az hata nedeniyle proje riskinin azalması ve proje zaman çizelgelerinin ve bütçelerinin daha iyi yönetilmesi de yer almaktadır (Sun and Liu, 2022). BIM, inşaat öncesi aşamada tasarım ve mühendislik sürecine önemli avantajlar sunmaktadır. Fiziksel bir temsil olarak farklı taraflar arasındaki çatışmaları kavramsallaştırmak ve ortadan kaldırmak için dijital görselleştirmeler yapabilmektedir. İşlevsel gösterim yoluyla yapısal tasarım, maliyet tahmini ve inşaat planlaması dahil olmak üzere bina tasarımı ve proje geliştirme faaliyetleri için kapsamlı yararlı verileri karşılaştırmaktadır. Aynı zamanda otomatik olarak karşılıklı tutarlı teknik çizimlerin doğrudan modellerden alınmasına izin vererek dokümantasyon süresinden tasarruf sağlamakta ve hatalardan kaçınılmaktadır (Visartsakul and Damrianant, 2023). BIM, bakım önceliklendirme, enerji yönetimi, sürdürülebilirlik değerlendirmesi ve yaşam döngüsü maliyet gibi birden fazla alanda incelenmiştir. BIM'deki ilerlemeler, kullanım aşamasında veri tabanlarını güncellemek için gereken süreyi %98 oranında azaltabilmektedir. Ancak dinamik bir sistem olarak Varlık Yönetimindeki (AM) en ilgili modern zorluklardan biri Varlık Yönetimi Sistemleri (AMS) aracılığıyla depolanan ve yönetilen statik verilerin entegrasyonu ile ilgilidir. Bina Yönetim Sistemleri (BMS) ve Nesnelerin İnterneti sensör ağları tarafından sağlanan dinamik veriler, belirli bina yönetim uygulamaları için devreye alınmaktadır (Moretti et al., 2020).

BIM'in Zorlukları; son yıllarda BIM'in tanıtımı sanayileşmiş inşaatteki kritik gelişmelerden biri olarak algılanmıştır. BIM, binaların tasarlanması, inşa edilmesi ve işletilmesi sürecinde kullanılan ve üretilen bilgileri tanımlamak ve yönetmek için kullanılan bir dizi teknolojiye ve ilgili çalışmalara atıfta bulunmak için kullanılmaktadır. BIM, fizibilite çalışması, tasarım, üretim, ulaşım dahil olmak üzere bir proje yaşam döngüsünün çeşitli kurulum ve bakım aşamalarında yaygın olarak benimsenmiştir. Bununla birlikte, BIM modifikasyon denetimi ve kaynağı gibi nadir çalışmalar BIM güvenliğine katkıda bulunmaktadır. Örneğin, BIM'deki modüler ürünlerin tasarımı, bütçe veya müşteri gereksinimleri nedeniyle değiştirilebilmektedir. BIM bilgilerinin değiştirilmesi genellikle revizyon geçmişini tutmak yerine

güncellenmektedir. Değişiklik kayıtları saklansa bile tarihsel bilgilerin bütünlüğünü garanti etmek zordur. Ayrıca, değişiklik kayıtları merkezi operatöre olan tam güvene dayanmaktadır. Dahili operatörler yanlış davrandığında tahrif edilmiş bilgiler üretimin yeniden çalışmasına ve hatta yasal işlemlere yol açacaktır. Kısacası asıl zorluk, BIM değişikliklerini güvenli bir şekilde izlemenin etkili bir yolunun olmamasıdır (Wu et al., 2022). BIM'i benimsemedeki beraberinde gelen zorluklar kullanıcılardan ve endüstrinin kendisinden kaynaklanmaktadır. Ancak BIM, uygulama alanlarını geliştirme ve genişletme potansiyeline sahiptir (Visartsakul and Damrianant, 2023). Bilgi yönetimi ile verilerin sağlanması dijital gelişen inşaat sektörü için önemli bir zorluktur. İnşa edilmiş bir varlığın planlama, tasarım ve inşaat aşamalarından işletme aşaması çekirdeğine ve binanın tesis yönetimi işlevine kadar verilerin kullanımı, temel iş ve destek hizmetlerini desteklemede entegrasyon, bilgi yönetimindeki teknik engeller nedeniyle sıklıkla sınırlıdır. Şimdiye kadar inşaat görevleri ve varlığa ilişkin gerekli değişiklikler biçim, performans ve belirli bir görevi gerçekleştirmek için gereken süre açısından tam olarak belirtilmektedir. Ayrıca, inşaat üretim ortamı sınırlıdır. Hareketsizlik, karmaşıklık, dayanıklılık, maliyet ve sosyal sorumluluk için yüksek talep gibi yapıları çevredeki bitmiş ürünlerin (yani varlıkların) benzersiz özelliklerinden dolayı esneklikten yoksundur. İnşaat sektörünün performans ölçümleri, planlama, tasarım ve inşaat aşamalarından elde edilen ve operasyonlara aktarılmayan veya yalnızca kısmen aktarılan verilerin kullanılmasındaki zorluk nedeniyle temel hizmet çıktılarına sektörler arası kıyasla daha az entegrasyon ile bütçeye karşı önemli bir maliyettir. Bununla birlikte, prensip olarak diğer endüstrilerden kanıtlanmış konseptler eleştirel bir şekilde incelenmeli inşaat endüstrisinde kullanım için optimize edilmeli ve tanıtılmalıdır (Wildenauer et al., 2022).

B. DT (Dijital İkiz)

DT'nin tanımı; insan refahını ve yaşam kalitesini iyileştirmek için süreçleri izlemek, optimize etmek ve tahmin etmek için fiziksel ve sanal bağlantıyı birbirine bağlayan, yaşayan fiziksel bir kuruluşun dijital bir kopyasıdır (Deprêtre et al., 2022). Kısaca, gerçek zamanlı veriler kullanılarak fiziksel bir nesnenin veya sistemin yaşam döngüsü boyunca çift yönlü veri akışının dinamik sanal temsilidir. Yapay zekânın IoT ve BIM teknolojileri ile entegrasyonu DT'ne minimum insan müdahalesi ile asimilasyon, analiz, simüle etme, tahmin etme ve harekete geçme olanağı tanımaktadır

(La Russa and Santagati, 2020). Kümülatif gerçek zamanlı verilerden elde edilen bir DT'nin gelişen profili sistem performansı hakkında daha iyi karar verme konusunda önemli görüşler sağlamaya yardımcı olmaktadır (Schweigkofler et al., 2022). Bir DT'ni nitelenmek için temel kriterler:

- DT, fiziksel ikizinin tüm bileşenlerini temsil eden ve tüm yaşam döngüsüyle ilgili bilgiler içeren bir dijital modelin oluşturulmasını (veya yeniden kullanılmasını) gerektirmektedir.
- Fiziksel ve sanal objeler arasında çift yönlü olarak farklı veri biçimleridir. Bu veriler DT ile ilişkili ek değerlerden birini sağlayarak bilgi tabanlarını oluşturmak için işlenecek sanal ikize sensörler tarafından "gerçek zamanlı" olarak gönderilmektedir.
- Bir DT, bazı karar alma ve optimizasyon işlemlerini gerçekleştirmek için çeşitli analizler, simülasyonlar ve tahminler gerçekleştirebilmelidir (Deprêtre et al., 2022).

1. DT Bileşenleri

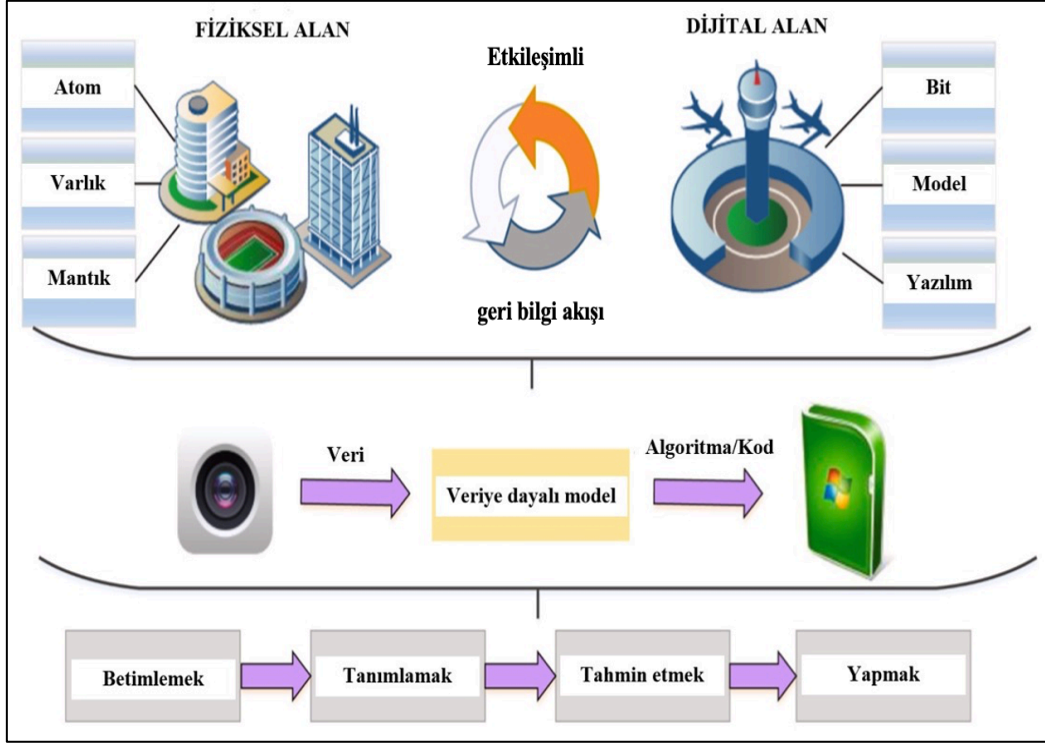
Bu bileşenler birlikte, gerçek zamanlı nesne izleme, veri görselleştirme, veri analizi ve 'if' simülasyonunun olası sorunları ortaya çıkmadan önce gidermesini, faydalı iç görüleri ve fırsatları açığa çıkarmasını sağlamaktadır (Lee and Lee, 2021). Dijital ikiz, mikro atomik seviyeden makro geometrik seviyeye kadar fiziksel olarak üretilen potansiyel veya gerçek ürünü tamamen tanımlamaktadır. Dijital ikiz teknolojisi, sanal varlıkları zenginleştirmek ve geliştirmek için donanım, yazılım ve IoT teknolojilerini entegre etmektedir. Dijital ikiz teknolojiler şu özellikleri sergiler: (1) çeşitli fiziksel nesne türlerini entegre etme; (2) fiziksel nesnelerin tüm yaşam döngüsünde bulunan bunlarla birlikte gelişen ve sürekli olarak toplanan bilgiler ve (3) fiziksel nesnelere tanımlama ve optimize etmedir. Dijital ikiz teknolojisi basit bir teknoloji veya tek bir uygulama değildir (Deng et al., 2021).

İnşaat için bir dijital ikiz şu anahtar parçalardan oluşur: Fiziksel katman, Dijital katman, Siber katman. **Fiziksel katman**, fiziksel dünyada maddi varlıklara sahip olma eğilimindeki nesnelere, varlıkları, malzemeleri, personeli, altyapıyı, tesisleri, sistemleri veya kaynakları tanımlamaktadır. **Dijital katman**, verileri orijinal, CAD veya IFC gibi farklı dosya formatlarında depolayarak statik, dinamik bir modelin ve gerçek zamanlı verilerin geliştirilmesini, değiştirilmesini, değerlendirilmesini, optimizasyonunu veya analizini tanımlamaktadır. Fiziksel varlıklar oluşturulmadan önce bir depolama dijital

ortamında dijital modeller oluşturulmaktadır. Doğrulama ve bu işlevlerin yanı sıra taraflar arasında bilgi paylaşma ve güncelleme işlemlerinin tümü Blockchain tarafından desteklenmektedir. **Siber katman** ise teknolojik altyapıyı ölçeklendirebilen karmaşık bir veri modeli oluşturmak için bilgi işlem ve depolama yetenekleri sağlamaktadır. Ek olarak veri modeli bir dizi Dijital İkiz etkin uygulama için bilgi ve uzmanlık oluşturmak üzere Blockchain, IoT, Büyük Veri ve Bulut teknolojilerinden yararlanılmaktadır (Celik et al., 2021).

Tipik bir DT beş öge gerektirir: Fiziksel varlık, sanal varlık, fiziksel ve sanal varlıklar arasındaki bağlantı, veri alışverişi ve veri işleme yetenekleridir. Sanal ortam (örn. model) fiziksel varlığı (örn. bina) yansıtmaktadır. Sanal varlık, gelişmiş ve entegre teknolojilerden oluşmaktadır (örn. nokta bulutu, fotogrammetre, lazer tarama, sensörler, AI, 5G, IoT ve blok tabanlıdır). DT farklı teknolojiler kullanarak heterojen fiziksel varlık verileri elde edebilirken sistematik veri eşleme ve farklı teknolojik kaynaklardan veri entegre etme, veri sınıflandırması standartlaştırılmadığı ve anlaşılmadığı sürece verimli DT uygulamalarına yönelik zorlayıcı olabilmektedir (Barbarosoglu and Milner, t.y.)

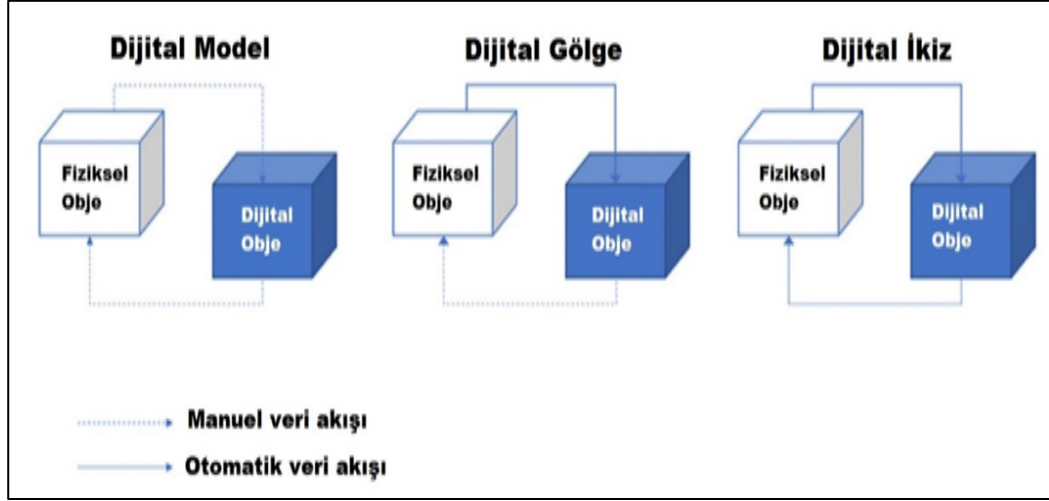
DT'ler, birden çok disiplini, fiziksel miktarları, ölçekleri ve olasılıkları entegre etmek için fiziksel modelleri, sensör güncellemelerini ve işletim geçmişini tamamen kullanan bir simülasyon süreci olan yeni BT tabanlı akıllı üretim uygulamalarıdır. DT'ler, sanal eşlemeler gerçekleştirerek fiziksel varlıkların tüm yaşam döngülerini ortaya çıkarmaktadır. Dijital modellere dayalı çeşitli simülasyonlar, analizler, veri toplama, madencilik ve hatta AI uygulamaları DT'lerin gerçek fiziksel sistemlerle uygulanabilirliğini sağlayabilmektedir (Wang et al., 2022). DT'lerin çağrışımı şekil 6'de sunulmaktadır.



Şekil 6 Dijital İkizlerin Çağrışımı (Wang et al., 2022) (Çeviren: Sariay E.)

2. Veri Entegrasyon Düzeyi

2014 yılında fiziksel bir varlık, sanal bir varlık ve bunları birbirine bağlayan veriler göz önünde bulundurularak üç boyutlu bir DT paradigması ele alınmıştır (Caramia et al., 2021). Bu üç bileşeni içeren kavramlar ve çerçeveler bu nedenle DT konseptine karşılık gelir ancak literatür veri entegrasyonu seviyesinde de farklılık göstermektedir. Bazı sanal gösterimler çift yönlü otomatik veri alışverişine izin vermez ancak bu durum tamamen entegre DTS'lerde (Dijital İkiz Sistemler) söz konusu olmaktadır. Belirsizlik tanımını çözmek için DT sınıflandırmasında üç alt kategori önerilmektedir. **Dijital Model (DM)**; en düşük veri entegrasyonuna sahiptir, fiziksel nesne ile dijital arasındaki veri akışı manuel olarak yapılır. Dijital veya fiziksel nesnenin durumundaki değişikliklerin eşyanın durumu üzerinde doğrudan bir etkisi bulunmamaktadır. **Dijital Gölgeyi (DS)**; fiziksel ve dijital nesnelere arasındaki veri aktarımı otomatik olarak gerçekleşmesidir. **Dijital İkiz (DT)**; fiziksel ve dijital nesne arasındaki her iki yönde veri akışının tam entegrasyonudur (El Jazzer et al., 2020). Aşağıdaki Şekil 7'de Dijital İkiz Entegrasyon düzeyleri gösterilmiştir.



Şekil 7 Dijital İkiz Entegrasyon Düzeyleri (b3lab.org, 2023)

Bir dijital model, herhangi bir durum verisini otomatik olarak dijital modele geri iletmeyen mevcut veya planlanmış bir fiziksel varlığı sanal olarak temsil etmektedir. Bunun yerine manuel çabalar fiziksel varlıktaki durum değişikliğinin dijital modele yansıtılmasına yardımcı olmaktadır. Dijital model, tek yönlü bir iletişim kanalı mevcut olduğunda dijital bir gölgeye dönüşür ve fiziksel varlığın mevcut durumuna göre sanal varlığı otomatik olarak güncellemektedir. Dijital ikiz ise ideal olarak fiziksel ve sanal varlıklar arasında otomatikleştirilmiş çift yönlü bir iletişim kanalı gerektirmektedir. Fiziksel varlığın durumundaki bir değişiklik, sanal varlığı günceller ve sanal varlıktaki bir revizyon fiziksel varlık ve süreçlerde bir değişikliğe yol açmaktadır. Şu anda inşaat endüstrisinde uygulanan BIM uygulamalarının çoğu DT konseptinin dijital model kategorisine girmektedir.

3. DT Çalışma Mekanizması

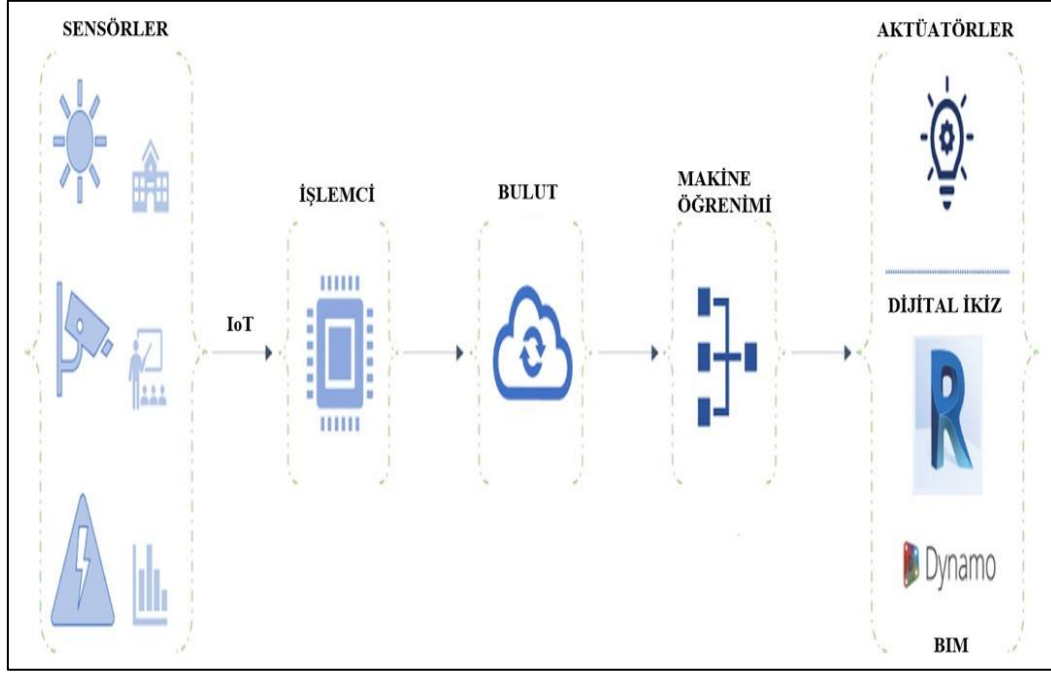
Grievess and Vickers (2016), bir dijital ikiz modelinin yalnızca mevcut bir fiziksel ürünü tanımlaması gerektiğini aynı zamanda operasyon, bakım, test ve sensör verilerinin derlenmesi gibi tüm aşamalarda ona bağlı kalması gerektiğini belirtmiştir. Bir dijital ikiz, başarısızlıkları tahmin etmeyi, davranışları tahmin etmeyi ve simülasyonlar gerçekleştirmeyi mümkün kılmalıdır. Modelin ultra gerçekçi olması ve yansıtılan nesneyi yüksek doğrulukla temsil etmesi gerekmektedir (Menegon and Isatto, 2023). Dijital ikiz IoT, RFID, GIS ve bilgi sensörleri gibi çeşitli toplayıcılar aracılığıyla veri sağlamaktadır. Bu ikiz veriler, fiziksel inşaat sistemlerini gerçek ve güvenilir bir şekilde yansıtabilmektedir (Wang et al., 2022). DT'de bulunan ve yansıtılan veriler geometrik verilerle (örn. Boyut ve hacim) sınırlı değildir. DT ayrıca

belirli fiziksel bileşenler hakkında program, maliyet, tedarikçi ve paydaş açıklamaları gibi geometrik olmayan verileri yansıtabilmektedir. Daha geometrik ve geometrik olmayan veriler yansıtıldıkça DT'nin işlevleri ve özellikleri genişletilebilmektedir. Veri alışverişi yöntemine bağlı olarak DT ne gibi senaryolar üretebileceğini simüle edebilir, üretkenliği analiz edebilir ve karar alma yöntemini destekleyebilir (Barbarosoglu and Milner, t.y.). Dijital ikizler aracılığıyla fiziksel cihazların çalışma modunu doğru bir şekilde anlamak mümkündür. Dijital model ve fiziksel cihaz arasındaki kesintisiz eşleştirme, ekipman izleme sisteminin gerçek zamanlı çalışma verilerini elde edebilir, arıza tahmini ve zamanında bakım gerçekleştirebilmektedir (Wang et al., 2022). Dijital ikiz, çoklu disiplinleri, çoklu fiziksel miktarları, çoklu ölçekleri ve çoklu olasılıkları entegre etmek için fiziksel modellerden, sensör güncellemelerinden, İşletme ve Bakım geçmişinden ve diğer verilerden tam olarak yararlanan bir simülasyon sürecidir. Bu nedenle, bir dijital ikiz gerçek dünya bilgilerini sanal bir alanda haritalayabilir ve fiziksel varlıkları dijital varlıklara dönüştürdükten sonra proje yönetiminin tüm yaşam döngüsünü gerçekleştirebilmektedir. Dinamik BIM ve DT ayrılmaz bir şekilde bağlantılıdır. Çünkü BIM, DT için temel teknik desteği sağlayabilmektedir. BIM modeli ve IoT'nin bir kombinasyonu olarak dinamik BIM, inşaat ve işletme verilerini dinamik olarak toplamak ve BIM ortamına entegre etmek için çeşitli sensörler kullanmaktadır. Bu nedenle dinamik BIM, hızlı karar vermeyi ve acil durumlara zamanında müdahale etmeyi mümkün kılan gerçek zamanlı bina bilgileri içermektedir (Tan et al., 2022).

DT fiziksel bir nesneyi doğru yansıtmak üzere tasarlanmış sanal bir modeldir. Önemli işlevsellik alanlarıyla ilgili çeşitli sensörler, enerji çıkışı, sıcaklık vb. fiziksel nesnenin performansının farklı yönleri hakkında veriler üretmektedir. Sensörlerden toplanan veriler daha sonra bir işleme sistemine aktarılmakta ve dijital kopyaya işlenmektedir. Toplanan veriler bilgilendirildiği sürece simülasyonları ve çalışma performansıyla ilgili sorunları çalıştırmak için sanallaştırılmış model kullanılır ardından orijinal fiziksel nesneye yeniden uygulama ve geri bildirim için bilgiler oluşturma amacıyla olası iyileştirmeler yapılmaktadır (Kit, 2022). Dijital ikiz; verileri, rolleri ve iletişim yetenekleriyle dijital dünyadaki nesnelere veya özneleri temsil etmektedir (Celik et al., 2021). Dijital ikizler, yaşam döngülerini kapsayan, gerçek zamanlı verilerden güncellenen ve karar vermeye yardımcı olmak için simülasyon, makine öğrenimi ve muhakeme kullanan bir nesnenin veya sistemin sanal

temsilleridir. Bu kavram kullanılarak hem izleme hem de kontrol eylemleri uygulanabilmektedir. Binaların izlenmesi ve değerlendirilmesi söz konusu olduğunda dijital ikizler hem veri toplamak hem de fiziksel ve sanal varlıklar arasında bilgi transferini kolaylaştırmak için kullanılabilir. Dijital ikiz teknolojisinin kullanılması mekânsal olarak dağılmış enerji tüketim verilerinin görsel temsilini kolaylaştırmaktadır. Bu bina operatörlerinin artan enerji kullanımına veya belirlenmiş tüketim ölçütlerini aşmasına katkıda bulunabilecek belirli ekipman veya kullanıcı uygulamalarını vurgulayıp bunlara odaklanmalarına olanak tanımaktadır. Dijital ikiz, sayısal verileri ve tamamlayıcı renk paletlerini içeren net bir biçimde bu bilgiyi sunarak enerji ile ilgili parametreler hakkında gerçek zamanlı bir güncelleme sağlamaktadır. Bu bilgi sağlama yöntemi düşük performans gösteren bina bileşenlerinin örneklerini kullanıcı dostu bir şekilde derhal belirleme olanağı sağlamaktadır (Spudys et al., 2023). Örneğin araştırmacılar bu konsepti akıllı sözleşmelere, tesis yönetimine ve bakıma uygulamaktalar. Kurulumdan önce sensör ağının kapsamı/kapsamları dikkatli bir şekilde tanımlanmalı ve sensörün nerede konumlandırıldıkları, hangi verilerin toplanacağı ve hangi protokolün kullanılması gerektiği dikkate alınmalıdır. Genel seçenekler sıcaklık, nem, ışık, ses, basınç, Ultrason, CO₂, Sıcaklık, VOC ve hareket sensörleri ancak yerleştirilecek sensör sayısı tanımlanırken toplanan bilgilerin öge boyu dikkate alınmalıdır. Ayrıca iletişim teknolojisi de ilgilidir çünkü verileri gerçek zamanlı olarak kolayca toplayabilmek zorunlu olmaktadır (Tagliabue et al., 2021).

Binaların ve şehirlerin modellenmeleri, analiz edilmeleri ve üretilmeden önce test edilmeleri durumunda daha canlı, verimli ve dayanıklı olacak şekilde tasarlanabilmektedir. Dijital ikiz, yoğun veri ve makine öğrenimi/yapay zekâ temelinde yeni modelleme ve analiz biçimleri için birleştirilmiş bir yaklaşım olmaktadır. Dijital ikiz gerçek zamanlı büyük veri kümelerine dayanan karmaşık birçok fiziksel sistemi izleyerek, modelleyerek ve optimize ederek dijital modellerin veya platformların oluşturulmasını ifade etmektedir. Dijital ikiz IoT, yapay zekâ, makine öğrenimi ve analizleri entegre ederek gerektiğinde bilgileri güncelleyip değiştiren canlı dijital simülasyon modelleri oluşturmaktadır. Dijital ikiz model neredeyse gerçek zamanlı durumunu temsil etmek için kendini sürekli olarak birden fazla kaynaktan öğrenip güncellemektedir (Zhang et al., 2021). Aşağıdaki şekil 9’da dijital ikiz için önerilen mimari gösterilmektedir.



Şekil 8 Dijital İkiz İçin Önerilen Mimari (Guida et al., 2021) (Çeviren: Sariay E.)

4. Dijital İkiz Teknolojisi ve Geçmişi

Son 10 yılda toplumun otomasyonunu daha da ileriye taşımak için hesaplama ve iletişimdeki son gelişmeleri tanımlayacak bulut bilişim, büyük veri, akıllı şehirler, makine öğrenimi, yapay zekâ gibi terimlerdir. Dijital ikiz, söz konusu süreçle birlikte ifade edilen ve genellikle gerçek zamanlı olarak gerçekleşen fiziksel sürecin işleyişiyle tam olarak eşleşen fiziksel bir sürecin ayna görüntüsünü oluşturmaktadır (Batty, 2018).

Yeni dijital teknolojilerin (ör. dijital ikiz, sanal gerçeklik, nesnelerin interneti, yapay zekâ) ortaya çıkışı ve gelişimi birçok sektörde yeni hizmet yaklaşımlarını mümkün kılmaktadır. Dijital İkiz, gelecek vaat eden dijital teknoloji platformlarından biridir. Dijital İkiz, fiziksel varlığın durumunun herhangi bir zamanda çift yönlü olarak entegre edilebilen veriler olarak sanal temsiline izin vermektedir. Sensörler, göstergeler, ölçüm makineleri, lazerler, görüş sistemleri ve beyaz ışık taraması ile donatılmış bir dijital ikiz fiziksel varlığın gerçek yaşam deneyim bilgilerini algılayabilmektedir. Dijital ikiz, olası arızaları doğru bir şekilde tahmin edebilir, bilgileri sisteme geri besleyebilir ve uyarıcı bilgilere göre tepki verebilmektedir. Dijital ikiz, yaşam döngüsü boyunca fiziksel varlık hakkında bilgi edinme ve tüm proje süreçlerini sürekli olarak izleme fırsatı sunmaktadır (Ozturk, 2021). Dijital ikiz teknolojisi, fiziksel kaynakları büyük ölçüde korumak ve bilginin değerini en üst düzeye çıkarmak için bilgisayarların güçlü bilgi işlem ve analiz avantajlarını

kullanarak sanal alanda fiziksel gerçeklik dünyasına paralel üretim faaliyetlerini simüle ederek tahmin etmektedir (Zhou et al., 2021).

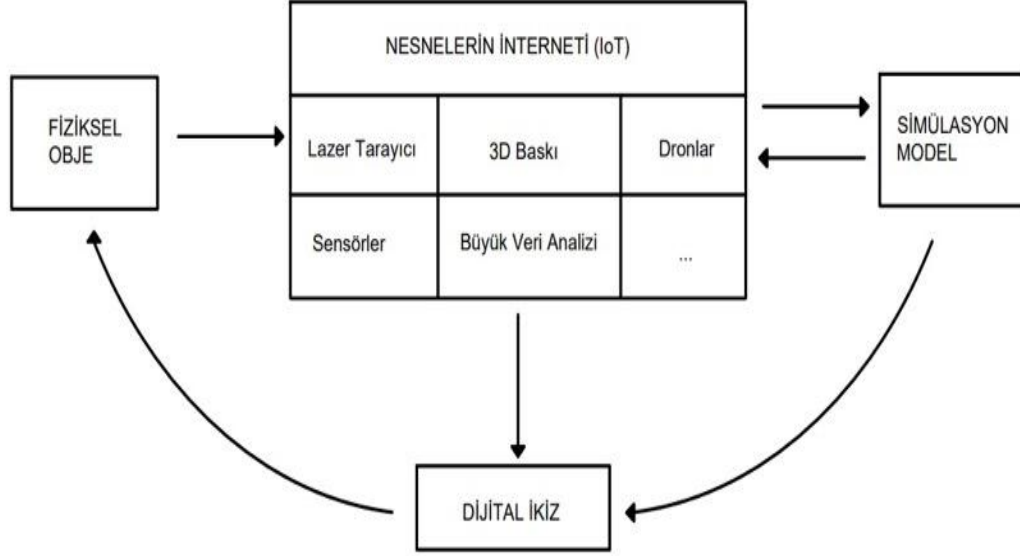
İnşaat mühendisliğinde kullanılan teknolojiler proje aşamasına (tasarım, uygulama, işletme, bakım ve iyileştirme) göre değişmektedir. Aynı şekilde, dijital ikizlerin uygulanabilirlik derecesi ve sunduğu hizmetler, girişimin aşamasına bağlı olarak farklı olacaktır. Tasarım aşamasında fiziksel parçalar henüz inşa edilmemişken dijital ikizler hem yeni yapıların inşası hem de mevcut olanların iyileştirilmesi veya genişletilmesi için çevreyi, araziye ve komşu binaları modellemek için yararlı olabilmektedir. İnşaat aşamasında dijital ikize bağlı akıllı sistemlerle donatılmış sahalar, operasyonların yönetimine ve gerçek zamanlı izlenmesine yardımcı olabilmektedir (Menegon and Isatto, 2023).

DT'nin çıkışı; dijital ikiz tanımını ilk olarak 2002 yılında Michael Grieves tarafından PLM (Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi) üzerine bir endüstriyel sunum sırasında “Dijital ikiz, mevcut fiziksel ürünlerin sanal temsilidir” şeklinde tanımlanmıştır. Daha eksiksiz ve yaygın bir tanım daha sonra 2012'de Glaesegen ve Stargel tarafından “Dijital ikiz, karmaşık bir ürünün mevcut en iyi fiziksel modelleri, sensör güncellemelerini vb. kullanarak çok fiziksel, çok ölçekli ve entegre bir olasılıksal simülasyondur” şeklinde tanımlanmıştır. Bu oldukça genel tanımlar bir CE'nin en ilginç özelliğine odaklanmamakta ve gerçek zamanlı veri toplamaktadır (Tchana et al., 2019). Bina otomasyonu ve mühendisliğinde dijital ikize doğru atılan bir adımı temsil etmektedir. Grieves'in 2002 yılında yaptığı DT tanımından sonraki araştırmalar dijital ikiz kavramına fiziksel geri bildirim dayalı dijital temsillerin gerçek zamanlı güncellemesini ve sistemin dahili durumuna bağlı olarak otonom kararlar alma kabiliyetini de içermektedir (Rosati et al., 2020). Dijital ikiz teriminin ortaya atıldığı zamandan beri popülaritesi giderek artmıştır ve artık endüstri 4.0'a geçişin kilit bir kolaylaştırıcısı olarak kabul edilmektedir (Tan et al., 2022).

Dijital ikizin kökeni; gerçek dünyayı temsil etmek için modellerin kullanılması mühendislik alanında yeni değildir. NASA (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi), Apollo programda 1967-1972 yılında uzay aracının fiziksel “ikizleri” inşa etmiştir. Ancak 20. Yüzyılın sadece son çeyreğinde, bilgisayarların dijital alanı içinde sanal kopyalar oluşturmak mümkün olmuştur. Dijital ikiz konseptinin kökeni Michael Grieves 2002 yılında ürün yaşam döngüsü yönetimi hakkında yaptığı bir sunumda Grieves, dijital ikiz modelinin tüm temel parçalarını göstermiştir: Gerçek nesne, sanal

nesne ve fiziksel varlık ile dijital kopya arasında veri toplama ve işlemedir. Grieves, ilk olarak bu ürünü “ürün yaşam döngüsü yönetimi için ideal kavramsal olarak” ifade etmiştir. Daha sonra, bunu “Aynalanmış Alanlar Modeli” olarak değiştirmişler ve daha sonra da “Bilgi Aynalama Modeli” olarak adlandırmışlardır. Sonunda Grieves, 2011 yılında NASA için çalışan John Vickers ile yazdığı bir makalede “Dijital İkiz” terimini kullanılmıştır (Hosamo et al., 2022). Dijital ikizin geçmişi uzun bir yol kat edilebilse de dijital ikiz teknolojisine değer verilmesi ve yaygın olarak kullanılması ancak son yıllarda olmuştur (Su et al., 2022). Michael Grieves ve John Vickers'ın çalışmalarından kavramın yalnızca üç temel özelliği ifade edilmektedir: Fiziksel ürün, sanal ürün ve bunlar arasındaki bağlantılardır. Ancak, NASA'da "ilk dijital ikiz" denilen ve Apollo 13'deki koşulları gerçek zamanlı olarak simüle etmek için oluşturulduğu 1960'lardan itibaren bir sistemin kopyasını oluşturma uygulaması keşfedilmiş ve uygulanmıştır. Bu, gerçek bir sistemin tekrarının, misyonun bozulmasını önlemek amacıyla sistemin koşullarını gerçek zamanlı olarak taklit etmek için kullanıldığı ilk örnektir. 2012 yılında DT kavramı NASA'da geçmiş verilere, fiziksel modele ve gerçek zamanlı algılamaya dayanan ilgili fiziksel modelin ömrünü yansıtan entegre çok fiziki, çok ölçekli, olasılık simülasyonu olarak anlaşılacak üzere yeniden tanımlanmıştır (Papyshev and Yarime, 2021). DT'nin; üretim, sağlık, havacılık, enerji, eğitim, tarım, meteoroloji ve otomotiv sektörlerinde kullanılmıştır. İnşaat sektöründe ise benimsenmesi oldukça yavaş olsa da uygulamasının büyük bir bölümü projelerin işletim ve bakım aşamasına odaklanmıştır (Opoku et al., 2022).

‘Dijital İkiz’ kavramı fiziksel sistemdeki ilgili herhangi bir durum değişikliğinin algılanmasını ve dijital durumunda ilgili değişikliğe neden olan bir veri akışını tetiklemesini sağlamak için fiziksel sistemin bir bilgisayardaki dijital temsiliyle birleşmesini ifade etmektedir. Ardından dijital ikiz tarafından oluşturulan yeni bilgiler müdahale edebilecek kullanıcılar için doğrudan çalıştırma veya görselleştirme yoluyla fiziksel sisteme geri beslenebilmektedir. ‘Aynalama’ veya ‘twinning’ metaforları fiziksel sistem ile dijital veya sanal muadili arasındaki karşılıklı hizalamayı ve karşılıklı değerini iletmek için kullanılmaktadır. Bu şekildeki teknolojiler, karmaşık dinamik sistemleri modelleyerek karar alma/verme için güçlü ve hızlı yanıt veren araçlar sunmaktadır (Dawkins et al., 2018). Dijital ikiz'in ana parçaları şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 9 Dijital İkizin Teknolojisi (Hosamo et al., 2022) (Çeviren: Sariay E.)

5. Dijital İkizi Mümkün Kılan Teknolojiler

Dijital ikiz, verileri yakalayan, hesaplayabilen ve görüntüleyebilen çeşitli teknolojik yeniliklerle inşa edilmekte ve kontrol edilmektedir. Bazı teknolojiler, dijital ikiz sistemin en önemli unsurlarını oluşturmaktadır. Bu nedenle, Nesnelerin İnterneti, 5G teknolojisi, AI ve Büyük Veri Analitiği, Görselleştirme Araçları, Dijital Platform, Sosyal Algılama, Katılımcı Algılama, Spatio-geçici dalgalanma, Semantik Model Yaklaşımı, Makine Öğrenimi Yaklaşımı ve Enerji Karşılaştırma Yaklaşımı ve çok daha fazlası mevcuttur (Greeshma and Edayadiyil, 2021). Dijital teknolojiler daha önce hayal bile edilemeyecek şekilde yerleşik ortama dahil edilmekte ve böylece tesislerin yönetiminin ‘akıllı’ olmasına yardımcı olmaktadır. Bu tür amaçlar için BIM internet tabanlı sistemler ve öğrenme özellikleriyle birlikte uygulanabilmesi şartıyla bir değer teklifi sunmaktadır. Yapay zekâ ve IoT ile ilgili diğer yenilikler çeşitli gerçek dünya ayarlarında kullanılabilen yeni ürünler üretmektedir (Alshammari et al., 2021). İnşaat sektöründe AI, IoT ve Blockchain teknolojilerinin ortaya çıkışı, projelerin yaşam döngüsü aşamaları boyunca sürdürülmesi için yeni yöntemler ve teknikler sağlamıştır. Bu tür çözümler kavramsallaştırma, prototip oluşturma, test etme ve tasarım optimizasyonu periyodunun yanı sıra yaşam döngüsünün operasyonel aşamaları boyunca da desteklenebilir. Bir inşaat projesinin ilk analiz aşamasında sayısal modelleme yöntemlerinin ve deneylerin önemi sorgulanamasa da işletme aşamasında gerçek zamanlı veri kullanılabilirliği fırsatı bir proje yaşam döngüsü boyunca süreçlerin izlenmesi ve optimize edilmesi için yeni fırsatlar sağlamaktadır

(Celik et al., 2021). BIM uygulamalarındaki gelişmeler bilgilerin oluşturulması, saklanabilmesi ve inşaat sektöründeki çeşitli paydaşlar arasından alınmasının değişmesine neden olmuştur. Ancak dijital teknolojiler nesnelerin interneti ve makine öğrenimi, derin öğrenme, veri analizi gibi yapay zekâ araçlarının ortaya çıkmasıyla gelişmektedir. BIM'nin gelişimi bu yeni teknolojilerle birlikte dikkatle düşünülmelidir (Feng et al., 2021). Dijital ikiz, nesnelerin interneti, yapay zekâ, makine öğrenimi ve veri analizini mekânsal ağ grafikleriyle entegre edebilmektedir. Bu nedenle bir dijital ikiz özelliklerini birden fazla kaynaktan sürekli olarak güncelleyebilmektedir. Dinamik ve veriye dayalı görselleştirmeyi desteklemek için zaman serisi sensor verilerini kullanan dinamik bir parametrik BIM yaklaşımıdır (Guida et al., 2021). Dijital ikiz, IoT, yapay zekâ, makine öğrenimi ve yazılım analizlerini tek bir sistemde bir araya getirmektedir. Dijital ikiz, çeşitli farklı teknolojileri kullanan bir kendi kendine öğrenme sistemidir. Dijital ikiz uygulamaların çok sayıda işlemi gerçek zamanlı veya hızlı işleme sürelerinde gerçekleştirebilmesi için yüksek hızlı bağlantı gerektirmektedir. Mevcut kablosuz ağlar çok çeşitli cihazlar ve sensörlerle gerçek zamanlı entegrasyon yapamamaktadır. 5G ağı tarafından sağlanan devasa veri bağlantısı, güvenlik ve gerçek zamanlı bulut süreci dijital ikizlerin bina teknolojisindeki zorluklarını karşılayabilmektedir (Zhao et al., 2022). Sensörler, RFID etiketleri, lazer tarama sistemleri, GPS verileri, dijital görüntüler ve mobil cihazlar gibi çok sayıda yöntem, bir dijital ikiz modeli beslemek ve güncelleyip veri elde etmek için kullanılabilir. Bu kaynaklar tarafından üretilen verilerin işlenmesi, analizi ve depolanması, hem üretilen büyük miktarda bilgi göz önüne alındığında teknolojik açıdan hem de operasyonel açıdan, kullanılabilirliği ele alma ihtiyacı göz önüne alındığında büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Bu nedenle büyük veri, bulut bilişim ve yapay zekâ gibi teknolojiler dijital ikizlerin uygulanabilirliği için çok önemlidir (Menegon and Isatto, 2023). Faaliyetlerin ve süreçlerin bilgisayara geçirilmesi ve dijitalleştirilmesi, fiziksel varlıkların yönetilme sürecini önemli ölçüde etkilemektedir. Yapay zekâ, nesnelerin interneti, bina bilgi modelleme, dijital ikizler, blok tabanlı, makine öğrenimi, veri analizleri, birçok sektörde üretkenliği artırmak için derin öğrenme ve benzeri faydalar sağlamaktadır. DT, siber fiziksel sistemler ve endüstri 4.0 gibi diğer paradigmlar ile daha iyi uyum sağladığından mümkün olmaktadır. DT, öngörücü analizler ile fiziksel dünyanın dijital dünyaya entegre edilmesine yardımcı olarak üretkenliği artırmaktadır (Opoku et al., 2022). Yapay zekâ, sensörler ve diğer IoT'ler fiziksel varlığı bir DT olarak yansıtmak için gereken verileri sağlamaktadır. DT

yaklaşımı, gerçek dünya koşullarını dikkate alarak bilinçli kararları simüle etmektedir. DT teknolojileri sayesinde, fiziksel varlıklar, ucuz ve akıllı sensörler, nesnelerin interneti ekipmanı, makine öğrenimi, yapay zekâ, blok zinciri ve analiz etmek için büyük veri analitiği kullanılarak dijital olarak entegre edilmiş varlıkların durumu ve gerçek zamanlı durumu platforma kolayca eşlenebilmektedir. Çift yönlü dinamik bilgi akışı ve kaliteli veri alışverişi, CDE kullanılarak fiziksel ve dijital varlıklar arasında kurulabilmektedir. DT için görselleştirme bileşeni BIM sürecinden üretilen bilgi açısından zengin bir 3D modele dayanır ve binanın gerçek zamanlı durumu çeşitli akıllı sensör ağlarından elde edilmektedir (Zhao et al., 2022).

DT sağlayan teknolojiler;

1. Bağlantı (sensörler, büyük veri, IoT, AI, bulut)
2. Sayısallaştırma (simülasyon modelleme, veri odaklı modelleme)
3. Yapay Zekâ (AI, analitik, aktuatör)

6. IoT (Nesnelerin İnterneti)

IoT konsepti 1990'lara dayanmaktadır. Birlikte çalışabilir bilgi ve iletişim teknolojileri aracılığıyla fiziksel ve sanal nesnelere birbirine bağlayan küresel bir altyapı olarak tanımlanabilmektedir. Dijitalleştirme geliştirmesi sayesinde analog bilgilerin dönüştürülmesi, bilgilerin saklanma, erişme, paylaşma ve işlenmesini kolaylaştırılarak sensörlerde maliyet azaltma ve işleme hızı artışı dünyanın IoT çağına girdiğini göstermektedir. IoT teknolojisi, satın alma kontrolü ve algı süreci de dahil olmak üzere dinamik veri toplama ve geri bildirim aktarmanın temelini oluşturmaktadır (Deng et al., 2021). BIM'in IoT'den gerçek zamanlı verilerle entegrasyonu, inşaat operasyonları ve yönetimi için bazı yeni yaklaşımların güçlü bir paradigmasını sağlamaktadır (Han et al., 2022). IoT olgunlaştıkça ve çeşitli sensörlerin maliyetleri düştükçe çok sayıda endüstriyel ürün bir sürü sensör kullanarak çalışma sırasında çevrelerini ve çalışma durumlarını algılamaktadır. Ayrıca, veri analizi ve optimizasyon yoluyla ürün arızalarından kaçınılabılır ve böylece kullanıcı deneyimi geliştirilebilmektedir (Wang et al., 2022). IoT, belirli bir insan müdahalesi olmadan etkileşime girebilen RFID etiketleri, sensörler, aktuatörler gibi bir çalışma ortamındaki her türlü nesne veya cihazlardan oluşmaktadır. Konsept aynı zamanda bilgi iletimini, gerçek zamanlı çoklu sensör izlemeyi ve bazı uygulama teknolojileri aracılığıyla akıllı ağa bağlı nesnelere içermektedir (Alvarez et al., 2021).

IoT, sensörler, otomatik uyum ve gelecekteki otomatik yakalama trendleri, yerinde ilerleme takibi, ölçümler ve izleme gibi en yeni teknolojilerin eklenmesiyle bulut üzerinden gösterilebilir bilgi oluşturma ve canlı dönüşümleri gösteren bilgi işlem çözümleridir (Roberts et al., 2021).

IoT günlük nesnelerin, bir hedefe ulaşmak için birbirleriyle ve diğer cihaz ve hizmetlerle iletişim kurmalarını sağlayacak tanımlama, algılama, ağ oluşturma ve işleme özellikleriyle donatılabileceği bir paradigmadır. IoT insandan insana veya insandan bilgisayara etkileşim gerektirmeden bir ağ üzerinden veri aktarımı yapabilen birbiriyle bağlantılı akıllı cihazlardan oluşan bir sistemdir. IoT cihazları (örn. sensörler, kameralar, tarayıcılar) yalnızca binalara değil tüm yerleşik ortama da kurulabilmektedir (Li et al., 2019). BIM ile birlikte “Nesnelerin İnterneti” ifadesinin yanı sıra “Siber-fiziksel Sistemler” ve “Kablosuz Sensör Ağları” gibi diğer ilgili terimler de değerlendirilmektedir (Shahinmoghadam and Motamedi, 2019). WSN’den (Kablosuz Sensör Ağları) farklı olarak bir IoT sistemi internet üzerinden bağlanan gömülü zekâ, algılama ve çalıştırma yetenekleriyle donatılmış gerçek dünya nesnelere meydana gelen bir ağdan oluşmaktadır. IoT sistemleri kullanılarak kablosuz algılama teknolojileri ve farklı iletişim protokolleri yardımıyla fiziksel dünya nesnelere ve koşulları hakkında canlı veri toplanması sağlanabilmektedir. WSN’ler çoğunlukla tek bir uygulamaya hizmet etmek için geliştirilirken IoT kavramı, sensör düğümlerinden gelen verilerin birden fazla uygulama tarafından ortak kullanımı ile ilgilidir (Shahinmoghadam et al., 2021). IoT, internete dayalı genişletilmiş bir ağdır. Akıllı tanımlama ve yönetim ile hayati algılama donanım altyapısı, RFID, NFC (Yakın Alan İletişimi) ve sensör ağlarından oluşmaktadır. Algılama cihazları, belirli işlemlere ulaşmak için farklı şantiye bileşenleri için kullanılabilir. Şantiyelerin ana bileşenleri şantiye alanı, sınır, yol, tesis, ekipman, malzeme, insanlar ve diğerleridir (Zhang et al., 2022). IoT, devasa algılama ve harekete geçirme cihazlarını birbirine bağlar ve bunların bir iletişim ağı aracılığıyla bilgi alışverişinde bulunmalarına ve paylaşmalarına olanak tanımaktadır. Böylece akıllı şehirler, akıllı ve bağlantılı sağlık hizmetleri dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yenilikçi ve akıllı uygulamaları etkinleştirmek için kullanıcılara ortamlar hakkında yeterli bilgi sağlayabilmektedir. Nesnelerin interneti, algılama teknolojileri, ağ iletişimi, bulut bilgi işlem, veri analitiği ve sistem kontrolü dahil olmak üzere çeşitli kolaylaştırıcı teknolojilere sahip oldukça disiplinler arası bir alandır. IoT algılama, daha sonra sanal ikizi kurmak ve çeşitli

analizleri mümkün kılmak için kullanılan fiziksel sistemlerin (öncelikle çevre ve iç ortam sakinleri) niteliklerini ve durumlarını yakaladığı için dijital eşleştirmenin vazgeçilmez bir bileşeni olmaktadır (Cai et al., 2023).

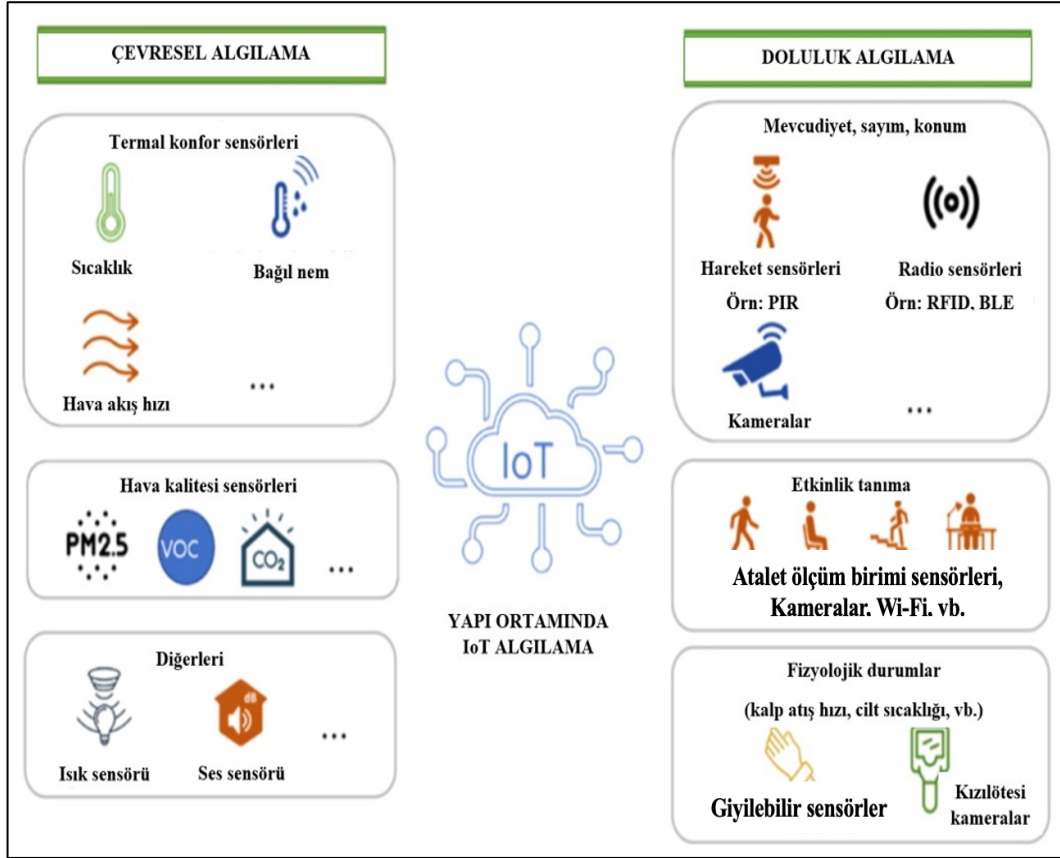
Dijital ikizler gerçek zamanlı varlık görselleştirme, davranış ve performans izleme ve çalışma simülasyonu ve optimizasyonuna olanak vermektedir. Bunların tümü proje katılımcıları arasında paylaşılması gereken önemli bilgi parçalarıdır. Özellikle bir veya daha fazla fiziksel varlık durumunu algılayan, bu koşulları insan ve/veya makine tarafından okunabilen sinyallere dönüştüren, başkalarıyla iletişim kurmak için internete bağlanan IoT sensörü dijital ikizlerin fiziksel varlıkların durumuyla senkronize edilmesini sağlamaktadır. Birçok farklı IoT sensörü türü vardır: GPS, görüntü sensörü, yakınlık sensörü, RFID sensörleri, hareket sensörleri ve biyosensörlerdir. Bu sensörlerin tümü yapıda yaygın olarak kullanılmaktadır (Lee and Lee, 2021). Bağlantılı ve otonom araçlar, robotlar ve akıllı evler gibi gelişmeler eski sistemlere entegre edilen IoT veya tamamen yeni konseptler oluşturulmasına olanak sağlayan IoT örnekleridir. Akıllı binalar, mimari yapıların geliştirme döngüsünde bir sonraki sınır olarak ortaya çıkmaktadır (Oyarhossein, 2021).

IoT gibi teknolojiler bina performansını izlemek için giderek artan bir şekilde yerleşik ortamda kullanılmaktadır. IoT ile BIM yöntemini birleştirmek yerleşik ortamla etkileşimi dönüştürmeyi mümkün kılmaktadır. BIM'nin IoT cihazlarından alınan gerçek zamanlı verilerle entegrasyonu dijital ikizler oluşturulmasıyla sonuçlanmaktadır. BIM-IoT entegrasyonu görselleştirme izleme verilerini gerçek zamanlı olarak izlemek için bir DT oluşturmak amacıyla BIM modellerinin geometrik ve parametrik özelliklerinden ve IoT sensörleri tarafından toplanan çevresel verilerin (örn. Sıcaklık, nem vb.) gerçek zamanlı akışından faydalanılmaktadır. Bu yaklaşım BIM verilerini sensörlerle entegre ederek binanın enerji ve iç mekân çevre performansını artırırken işletme maliyetlerini de azaltmak için ortak bir veri tabanı oluşturan yeni bir yaklaşımdır (Schweigkofler et al., 2022). BIM uygulamasının yanı sıra yakın zamanda ortaya çıkan IoT uygulamaları inşa edilen ortamın yaşam döngüsü boyunca birçok benzersiz bilgi ve karar verme yeteneği sağlamaktadır. Ortamda gerçek zamanlı olarak kullanılan çevrimiçi sensörleri bağlayabilme özelliği bina tasarımının dijital ikiz tanımına yol açmıştır. Dijital ikizlerin amacı, bina tasarımında sorunsuz bir şekilde çevre oluşturma süreci, altyapı çözümleri, çevre izleme ve diğer yaşam süresi süreçlerinin yönetimi ve kontrolü için fiziksel dünyayı sanal bir

platformla senkronize etmektir (Sun and Liu, 2022). Daha iyi bilgi görünürlüğü, izlenebilirlik ve daha işbirlikçi bir çalışma ortamı sağlayarak üretim yönetimini kolaylaştırmak için çeşitli IoT özellikli BIM platformları geliştirilmiştir. Bununla birlikte genel olarak mevcut platformlar iki eksiklikten muzdariptir: (1) IoT ağlarının "tek başarısızlık noktası" sorunu ve (2) çoklu kaynaklardan gelen BIM değişikliklerinin kaynağının nasıl garanti edileceğidir (Wu et al., 2022). Genel olarak, BIM'den gelen statik bilgiler ve IoT cihazlarından gelen dinamik bilgiler bir binanın gerçek zamanlı durumunu ve operasyonlarını açıklayabilmektedir. BIM'i IoT verileriyle birleştirerek binanın yaşam döngüsü boyunca çeşitli paydaşlara tanımlayıcı, tanısıl, tahmine dayalı, kuralcı ve görsel hizmetler sağlamak mümkün olmaktadır. Aslında, BIM ve IoT'nin veri füzyonunu uygulamak yalnızca BIM'in veri madenciliğine katkıda bulunmakla kalmaz aynı zamanda AEC endüstrisinde düşük seviyeli verilerin yüksek seviyeli eyleme geçirilebilir bilgilere (karar verme gibi) dönüştürülmesini de gösterebilmektedir (Huang et al., 2023).

Senkronize simülasyonlar IoT verilerini BIM modeliyle ilişkilendirerek ve analitik araçlar kullanarak mümkündür. Bu BIM'in mümkün olan teknoloji sisteminin çekirdeğini temsil eden ve akıllı inşaat süreçlerinin üretimini kolaylaştıran gerçek zamanlı IoT verileriyle birleşimidir. Bu nedenle IoT yalın inşaat stratejileriyle ilgili çabalar için temel bir unsurdur. IoT daha özel olarak ihtiyaç duyulan uzman sayısını belirlemeye, kontrol edilen verileri ölçmeye ve dikkate alınması gereken alanları tanımlamaya yardımcı olmaktadır (Alshammari et al., 2021). Üretim ve inşaat aşamasında sensör verileri ve BIM teknolojileri şantiye programını izlemek ve tedarik sürecini iyileştirmek için kullanılabilir. Sanal Gerçeklik (VR) ve Artırılmış Gerçeklik (AR) kullanımı sanal gerçeklik gözlükleri veya çok yönlü ortamlar kullanarak gerçekliği simüle eden veya canlı görünüme dijital öğeler ekleyen (örn. Oyun Pokemon Go gibi) inşaat işlemlerini destekleyebilir ve yürütme sürecindeki sorunları (örn. Sistemler ve yapısal parçalar arasındaki parazit) önleyebilmektedir. GPS ve RFID sensörleri bina bileşenlerinin BIM modeline göre konumlarını izlemek için kullanılmaktadır. İnşaat lojistiği ve yönetiminde, inşaat tedarik zincirinin dijitalleştirilmesi ve otomasyonu ile ilgili yalın yapı bağlamında inşaat sahası operasyonlarını izlemek ve iyileştirmek için IoT verileri de kullanılabilir. H&S (Sağlık ve Güvenlik) yönetiminde çalışanların eğitim sürecini ve riskleri tanıma ve değerlendirme becerilerini geliştirmek için VR ve BIM verileri kullanılmaktadır

(Moretti et al., 2020). Aşağıdaki şekil 10’da yapı ortamında IoT algılama uygulamaları gösterilmiştir.



Şekil 10 Yapı Ortamında IoT Algılama Uygulamaları (Cai et al., 2023) (Çeviren: Sariay E.)

7. CPS (Siber Fiziksel Sistemler)

CPS, fiziksel süreçlerin hesaplamaları etkilediği geri bildirim döngülerinde fiziksel giriş ve çıkışla etkileşen dinamik sistemler olarak tanımlanmaktadır. CPS'in temel bileşeni aralarında “çift yönlü iletişimi” dir. Gömülü sistemler olarak bilinen CPS'in ulaştırma, sağlık, savunma sistemleri, elektronik ve kritik altyapı sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. CPS, fiziksel süreçleri ve hesaplamayı bir ağ olarak entegre etmeye odaklanarak son yıllarda geliştirilmiş gömülü sistemlerin bir uzantısı olarak kabul edilebilmektedir. CPS'in endüstriyel ortamlarda odak noktası esneklik, özelleştirme, etkileşim ve genişletilmiş işlevlerdir (Hasan et al., 2022).

Sensör ağları, CPS iletişim altyapısı tasarlamak için kullanılır ve dijital ikiz teknolojisi CPS'e durumu simüle etme, tahmin etme, izleme ve optimize etme açısından alternatif sonuçlar sunmaktadır. Bu nedenle sürekli geri bildirim kullanılarak sistemin güvenliğini sağlamak için CPS'in sanal gösteriminden faydalar elde

edilebilmektedir. CPS'in gerçekleştirileceği bir yöntem de IoT'yi kullanmaktır. IoT bir binanın inşaat yaşam döngüsünün çeşitli öğelerini birbirine bağlayıp ve bu şekilde verileri toplamaktadır. BIM'i IoT'ye dahil ederek gerçek zamanlı yapı verileri yapı tasarım modeliyle birleştirilebilmektedir. Böylece tasarımcılar ortaya çıkan sorunları çözmek için gerçek zamanlı olarak etkileşime geçebilmektedir. IoT'yi mobil cihazlar, sensörler ve yazılımlarla birleştirmek akıllı inşaat sahaları hakkında uzaktan bilgi sağlamaktadır. Bu nedenle bina sahalarına birlikte çalışabilirlik ve bağlantı olanağı sağlayan dijital ve fiziksel dünyaların etkili bir birleşimidir (Alshammari et al., 2021).

Dijital ikizi CPS'in oluşturulmasıyla sağlanan bir teknolojiyle sunarak bir varlığın simülasyonuna ve izlenmesine olanak sağlamaktadır. CPS'in dijitalleşmenin temeli olduğunu ve IoT, AI, Büyük Veri Analizleri ve Bulut Bilişim gibi birçok farklı teknolojinin oluşturulmasına katkıda bulunduğu dolayısıyla aralarındaki ilişki daha iyi anlaşılmağa başlanmıştır. IoT, fiziksel varlıktan veri toplayan sensörlerin mimarisidir; CPS ise fiziksel varlığı bu varlığın dijital ikizini ve aralarındaki köprü olan IoT'yi kapsamaktadır. Dijital ikiz, mühendislik sistemleri arasındaki bağımlılıkları anlamaya çalışan karmaşık bir mühendislik geçmişinden kaynaklanırken CPS geleneksel yapı teknolojisi terminolojisini kullanarak karmaşık sistemleri etkili bir şekilde tanımlamaya çalışan daha bilimsel bir arka plandan doğmuştur. Bu iki kavram fiziksel varlıktan ve fiziksel varlığın siber ortama aktarılacak varlık verilerinin toplanmasıyla ve benzer şekilde analiz ve karar alma sonrasında siber komutların etkinleştirilmesiyle görevlendirildiği dijital/siber öğeden oluşmaktadır (Douglas et al., 2021). DT ve CPS arasındaki bazı karşılaştırmalar: (1) DT ve CPS, fiziksel nesnelere varlığını vurgular, (2) Her iki kavram da fiziksel nesnelere ile sanal modeller arasında zamanında veri aktarımını içermekte, (3) DT, sanal bir model gerektirirken, CPS'in buna ihtiyacı yoktur. Başka bir deyişle, DT “sanal” üzerine odaklanırken, CPS “siber” üzerine odaklanmakta, (4) DT, bir fiziksel varlık ile ona karşılık gelen sanal varlıklar arasında ikiz bir ilişkiye sahip olmalıdır; ancak, CPS'in buna ihtiyacı yoktur (Jiang et al., 2021).

Siber fiziksel sistem sorunları fiziksel ve siber bileşenler arasındaki bağlantıyı analiz etme kapasitesine ihtiyaç duyar. CPS'in güvenliği sensör ağı güvenliğine dayanmaktadır. Sensörler CPS ikiz yapısına doğrudan bağlanabilmektedir. Dijital ikizler, CPS durumunu izlemek, simüle etmek, optimize etmek ve tahmin etmek için yeni potansiyel sonuçlar sağlamaktadır. Bu nedenle, bir CPS'in sanal bir kopyası kullanışlıdır ve bir sistemin güvenliğinin sağlanmasında önemli rol oynayabilmekte,

kişisel memnuniyeti ve refahı artırmak için sistemi geri bildirimlerle güvence altına almada önemli bir rol oynayabilmektedir. Ayrıca kişisel memnuniyeti ve refahı artırmak için insanlara sürekli geri bildirim de sağlamaktadır. İnşaat sektöründeki son teknolojik gelişmeler BIM gibi bilgi modellerini geliştirmek için CPS kullanarak akıllı şehirler oluşturmak amaçlanmaktadır (Alshammari et al., 2021).

8. Blockchain

Blockchain teknolojisi, işlemlerin, lojistiğin ve insan davranışının güven mekanizmasının temelini oluşturmaktadır. 5G ile iş birliğine dayalı bilgi işlem etkili gerçek zamanlı yanıtların temelini oluşturmaktadır. Blockchain teknolojisi protokoller, karma algoritmalar, genel anahtar şifrelemesi satış zincirlerinin uygulamaları finans, sigorta, lojistik, enerji, mimari, üretim ve nakliye ile temel bilgiler ve algoritmalar gibi kavramların bir birleşimidir. Blockchain teknolojisi, davranışsal bilgileri dijital ikizler arasında kaydeder ve verilerin değerini, güvenliğini, hakkını ve sahipliğini garanti eder. Blok tabanlı ve 5G tabanlı IoT bağlantının, güçlendirmenin ve paylaşımın farkına vararak gelecekte tüm fiziksel varlıkların birbiriyle bağlantısını teşvik edecektir. Hem karar vericiler hem de vatandaşlar 5G tabanlı IoT hizmetlerinin ve 5G tabanlı IoT cihazlarının dijital ikiz şehirlerde entegrasyonunun keyfini çıkaracaklardır (Deng et al., 2021).

DT'nin kilit ögesi veri alışverişi olduğundan blok tabanlı DT ile entegrasyonu çeşitli paydaşlar arasında merkezîyet, güvenlik ve karışık veri alışverişi ile sonuçlanacaktır. Blockchain, inşaat şirketlerinin dijital değerlerini geliştirebilir ve akıllı bir ortamda akıllı parasal işlemleri kolaylaştırabilecektir (Sepasgozar, 2021).

Blockchain, dijital bir ikize çeşitli güvenlik özellikleri sağlamak için kullanılabilir. Bu tür hizmetler, akıllı sözleşme etkileşimleri tarafından uygulanan izlenebilir, korumalı ve şifreli hizmetleri içermektedir. Blockchain teknolojisi ve bulut bilgi işleminin birleşimi, dijital güvenlik ve hizmet kullanılabilirliğini ele almaktadır. Blockchain, bulut sitelerini çeşitli protokollerin ve işlemlerin konuşlandırılması için düğümler olarak kullanarak bulut sınırlamalarının çoğunu ortadan kaldırmaktadır. Aynı platformdaki tüm düğümler verileri paylaşabildiğinden her düğüm etkileşimlerin bir kaydını tutarken esnekliği artırmaktadır. Blockchain ağı, tüm blok kayıtlarını bir karma koda dönüştürür ve bir şifreleme algoritması kullanan her blok için bir kriptografik imza sağlamaktadır. Böylece herhangi bir kesinti olmadan bulutta depolanan veriler Blockchain

düğümlerinde çoğaltılarak veri verimliliği ve veri geçerliliğini optimize etmektedir. Blockchain verimliliği artırmak, kurumsal ortamı değiştirmek ve dijitalleşmenin benimsenmesini sağlamak için daha verimli yönetişime ve çeşitli teknolojilerin kullanımına yol açabilmektedir. Blockchain teknolojisi daha yüksek düzeyde veri izlenebilirliği sunarak, katılımı teşvik ederek ve projelerde şeffaflık sağlayarak inşaat endüstrisindeki süreçlerin otomasyonunu ilerletme potansiyeline sahiptir (Celik et al., 2021).

9. RFID (Radyo Frekansı Tanımlama)

RFID teknolojisi son yirmi yılda nesnelere tanımlamak ve izlemek için inşaat alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. RFID etiketinden okuyucuya kısa bir mesafe içinde küçük miktarlarda veri aktarmak için radyo dalgalarını kullanmaktadır. RFID etiketleri iki ana tipten oluşur: Aktif ve pasif. Aktif bir etiketin dahili bir güç kaynağı ve kendi vericisi vardır ancak pasif bir etiket yoktur. RFID etiketleri çeşitli yüzeylere yapıştırılır ve birçok farklı ortam (örn. ıslak, sert) için geçerlidir. Genellikle, benzersiz kimlik numaralarıyla kodlanmış pasif RFID etiketleri ön üretim ürünlere yapıştırılır veya bunlara gömülür. RFID etiketlerindeki veriler daha sonra mobil RFID el tipi veya sabit RFID portalı tarafından okunur. Okuyucudaki GPS işlevi konumu belirlemektedir. Bir Wi-Fi ağı varsa veriler hemen arka uç bilgisayar sistemine gönderilebilir (Chen et al., 2021).

RFID teknolojileri günlük işletme ve bakım yönetimi ortamlarında materyalleri ve tesisleri kaydetmek için umut vaat eden fırsatlar göstermektedir. Ancak, yoğun emek ve eğitimli çalışanlar gerektiren uygulama dönemlerinde kurulum, tarama ve bakım işlemlerinin tümü gerekmektedir. Lazer tarama tabanlı yaklaşımlar ve radyo tabanlı teknolojilerle karşılaştırıldığında görüntü tabanlı yaklaşım ve entegrasyonu son yıllarda giderek daha fazla ilgi görmüş, işletme ve bakım aşamalarında ekonomik, uygulanabilir ve gelecek vaat eden bir alternatif olarak kullanılmıştır. Görüntü tabanlı olduğu gibi BIM oluşturma yaklaşımları ayrıca üç temel adıma ayrılabilir (yani (1) veri yakalama ve işleme, (2) nesne tanıma ve (3) olduğu gibi BIM oluşturma). Bu inşaat sürecini kolaylaştırmak veya belirli alanları iyileştirmeye odaklanmak için çeşitli görüntü tabanlı sistemler geliştirilmiştir (örneğin, otomatik tanıma kaynakları ve malzemelerin sınıflandırılması gibi) (Lu et al., 2020).

RFID nesnelere uzaktan otomatik olarak tanımlanmasını sağlayan bir kablosuz teknolojidir. Bir RFID sisteminin ana bileşenlerinin herhangi bir nesneye

eklenmiş veya iliştilirilmiş etiketlerden, antenlerden okunmuş özel okuyuculardan ve bir işleme aygıtından oluşmaktadır. RFID etiketleri gibi teknolojilerin yapısal öğelerde veya fiziksel kaynaklarda kullanılmasının akıllı bir nesnenin geliştirilmesi olarak anlaşılabilceğini göstermektedir. Bu yeni nesnelere gelişmiş kaynaklar olarak sınıflandırılır. Algılama, işleme, değerlendirme ve tepki verme imkanları vardır (Lima et al., 2021). Bir bilgi modelleme sistemi, tanımlanan işbirlikçiler arasında uçtan uca iletişim, veri alışverişi ve bilgi paylaşımı sağlamak için gerekli tüm araçları ve otomasyonu sağlamaktadır (Deng et al., 2021).

10. Dijital İkizlerin Uygulama Alanları ve İşlevleri

İnşaat sonrası aşamasında DT teknolojisi tesis yönetimi, bakım yönetimi, izleme, lojistik süreçleri, kullanıcıların konforunu artırma, bina tasarımının optimizasyonu için analizinde ve projenin enerji simülasyonuna uygulanmaktadır. DT tesis yöneticilerine operasyon ve bakım oluşturma, performans yönetimi oluşturma ve enerji tüketimi optimizasyonu oluşturma konusunda kritik kararlar alma fırsatı sağlayabilmektedir. Öngörücü bakıma yardımcı olan ve iyi bilgiye dayalı karar alma olanağı sağlayan gerçek zamanlı verilerin toplanmasını sağlayarak projenin operasyonel verimliliğini artırmaktadır. DT ayrıca çalışma alanlarının ortam sıcaklığını ve nemini izleme bina yönetim sistemlerinden alınan verileri kullanarak bakım planlaması optimizasyonu ve arıza/bakım kayıtlarını belirleme ve bakım görevlerini önceliklendirerek kaynak tahsis etme potansiyeli sağlar. Verimli ve sürdürülebilir binaları başarılı bir şekilde elde etmek için gerçek zamanlı enerji değerlendirmesi, iç mekân çevre izleme, iç mekân termal konforu, alan yönetimi, bina yönetiminde tehlike izleme gibi önemli faktörler çok önemli hale gelmiştir (Kit, 2022). Birbiriyle ilişkili sayısız tasarım ve inşaat görevleri mimarlar, mühendisler ve yöneticiler tarafından maliyet, program, kaynak ve kalite özellikleridir. Verimli yönetim, etkili izleme ve kontroller gerektirse de yerinde fiziksel izleme pahalıdır, zaman alır ve öznel yoruma açıktır. DT'nin temel işlevi, fiziksel bir yapıyı doğru bir şekilde görselleştirerek proje ve ürün yaşam döngüleri boyunca sürekli olarak büyüyen gerçek zamanlı verileri yakalamaktır. DT yaklaşımını en sık kullanan ürün yaşam döngüsü aşamaları, inşaat aşamasını izleyen işlemler ve bakım aşamalarıdır. Planlama, tasarım, tedarik, devreye alma ve devreden çıkarma, DT yaklaşımını uygulayan ürün yaşam döngüsü aşamalarıdır (Barbarosoglu and Milner, t.y.).

11. İnşaat Sektörünün Dijital Geçişi

Endüstri 4.0 olarak da bilinen dördüncü sanayi devrimi entegre siber fiziksel sistemler için dijital ve fiziksel etki alanlarının çapraz bağlantısı ile karakterize edilmiştir. Endüstri 4.0'de daha fazla odak noktası önceki endüstriyel devrimlerde olduğu gibi verimliliği artırmak yerine izleme ve kontrol özelliklerini artırmak için IoT'tan yararlanmaktadır. IoT, belirli bir ortamda çeşitli bilgisayarlar, akıllı cihazlar, donanım, elektronik cihazlar ve diğer nesnelere arasındaki bağlantı ile karakterize edilen nispeten yeni bir olaydır. İnsanla etkileşimin veri analizi veya sistem geçersiz kılma olaylarına en aza indirildiği günlük süreçlerin otomasyonu dördüncü sanayi devriminin bu teknolojisindeki temel özelliklerinden biridir. Endüstri 4.0'ın önemli bir özelliği de siber fiziksel sistemleridir (Hasan et al., 2022). Endüstri 4.0'ı destekleyenler şunlardır: IoT, büyük veri, gelişmiş görselleştirme, AR, VR ve simülasyon, sistem entegrasyonu, bulut bilişim, otonom sistemler ve siber güvenlidir (Rahimian et al., 2022).

İnşaat sektöründe yapı (ürün) odaklı bir temel teknoloji olarak BIM dijital ikiz ile benzer bir rol oynamaktadır. Bu, dijital ikizin ve BIM'in temellerinin farklı olduğu ancak işlevsel hedeflerinin aynı olduğu anlamına gelmektedir. Endüstri 4.0 ilkelerini belirli endüstrilerle birleştirerek akıllı üretim, akıllı inşaat vb. farklı modlara ulaşılabilmektedir. Ürünler ve uygulama yerleri endüstri 4.0'ın etkinleştirici teknolojileri uygulanarak akıllı modlara uyum sağlamak için akıllı hale dönüştürülebilmektedir (Ding et al., 2018). BIM, IoT, büyük veri, yapay zekâ, dijital ikiz ve diğer teknolojilerin hızla gelişmesi inşaat sektörünün dönüşümü için destek sağlamıştır. Bu teknolojilerin uygulanması tasarım ve inşaat entegrasyonunun geliştirilmesi ve inşaat endüstrisinin dijital olarak yükseltilmesi için yeni fırsatlar getirecektir (Zhou et al., 2021). Dijital ikizler, bu geçişin anahtar sağlayıcısı olarak sürekli olarak tanımlanır. Üretim sektörü, fabrikalar ve tedarik zincirleri arasındaki M2M (Makineden Makineye) iletişimin daha az hata, daha az yeniden çalışma ve ilgili herkes için daha yüksek üretkenlik anlamına gelmesiyle dijital ikizlerde erken gelişmeye öncülük etmiştir. Mevcut bilgi işlem kaynakları ve cihazlar ile sistemler arasındaki bağlantı arttıkça daha yüksek veri hacimleri elde edilebilir, analiz edilebilir ve böylece DT'nin geliştirilmesine olanak sağlanır (El Mokhtari et al., t.y.). Dijitalleştirme inşaat sektörünün tamamını değiştirme ve bunu önemli ölçüde geliştirme potansiyeline sahiptir. Üretkenliği artırmak, zaman ve maliyet tasarrufu

yapmak için en güçlü koldur. En büyük avantaj, verimli kontrol ve yönetim sağlayan dijitalleşme yoluyla netliğin elde edilmesidir. Yeni dijital teknolojiler, inşaat sektörüne neredeyse girmektedir. Birçok mükemmel etkileşimli çözüm vardır. Ancak tüm bu çözümler ayrı çözümlerdir ve tüm yaşam döngüsü sorununun yalnızca bir parçasıdır. Dijitalleşme ve BIM inşaat sektöründe şimdiden geliştiriliyor ancak sektör dijital dönüşümü karmaşık hale getirmek için hâlâ birçok zorlukla karşılaşılıyor. İnşaat sektörü, geleneksel malzeme ve inşaat tekniklerinin yaratıcı kullanımı, atık azaltma ve doğal ortama daha saygılı bir planlama çerçevesi ve mekanizması ile karbon emisyonlarına karşı daha büyük boyutlara maruz kalmasıyla değişim için en acil ve heyecan verici hedeflerden biridir. Dünya çapında şehirler, sürdürülebilirlik amaçlarını elde etmek için yenilikçi dijital teknolojiden faydalanır. Topluluk içinde üretkenliği, sürdürülebilirliği ve atık yönetimini geliştirmek için sensörler, IoT, AI ve veri analizi teknolojileri gibi yükselen eğilimler kullanılır. Geleneksel tasarım çerçevelerinin giderek daha yeni sanal modelleme teknolojileriyle değiştirilmesiyle inşaat sistemi bir geçiş yaşamaktadır (Greeshma et al., 2021).

Dijitalleşmenin inşaat sektörüne faydaları arasında üretkenliği artırmak, karmaşıklığı yönetmek, proje gecikmelerini, maliyet fazlalığını azaltmak, güvenlik ve kaliteyi artırmak yer almaktadır. BIM'in benimsenmesinin önündeki en önemli güçlükler arasında güven eksikliği, kötü iş birliği ve bilgi paylaşımına isteksizlik yer almaktadır (Li et al., 2019). DT, Endüstri 4.0'ın etkin teknolojilerinden biri olarak üretimde yaygın bir şekilde kullanılsa da inşaat sektöründe göreceli olarak yeni bir trenddir. Bu yüzden, inşa edilen ortamın sürdürülebilirliği, olağanüstü topikliğine rağmen inşaat sektöründe uzun bir geçmişe sahip olan bir araştırma konusudur (Tagliabue et al., 2021).

Son yıllarda dijitalleşmeyi ilerletmek amacıyla yapay zekâ ve robotik, büyük veri ve analitik, sanal ve artırılmış gerçeklik, gelişmiş BIM uygulaması, bulut ve uç bilgi işlem gibi çeşitli endüstriyel ve araştırma çalışmalarında çeşitli dijital eşleştirme teknolojileri sunulmaktadır. Bu tür bir dijitalleşme farklı çok paydaşlı sistemlerde ihtiyaç duyulan bilgi paylaşımı ve veri güvenliği ihtiyacı ile ortaya çıkmıştır. BIM, bir binanın yaşam döngüsü boyunca inşaat sektöründe dijitalleşmeyi sağlamak için etkili bir teknoloji olarak gösterilmiştir. BIM, ağ bağlantılı sistemde aynı düzeyde "güven" gerektiren dijital eşleştirme stratejileri için iş birliğini kolaylaştırmaktadır. Verilerin güvenli bir ortamda saklanması ve değiş tokuş edilmesi gerektiğinden, verimlilik ve

güvenliği sağlamak için teknolojinin iyi tasarlanması gerekmektedir. BIM'in blok zinciri, yapay zekâ, bulut bilişim ve makine öğrenimi gibi gelişen teknolojilerle birleşimi, inşaat sektörü için önemli dijital dönüşüm fırsatları sağlamaktadır. Bir bilgi işlem düzeyi olarak bulut bilgi işlem ve blok zinciri görselleştirilmiş bir veri tabanının gerçek zamanlı olarak oluşturulmasını ve koordinasyonunu kolaylaştırarak daha etkili ve güvenli disiplinler arası iş birliğini mümkün kılmaktadır (Celik et al., 2021).

DT uygulamaları COVID-19 salgınında önemli ölçüde artmıştır. 2017 yılından bu yana yürütölen araştırma miktarı başta mühendislik ve bilgisayar bilimleri alanlarında olmak üzere DT yaklaşımına önemli ölçüde ilgi göstermektedir. DT yaklaşımının küresel pazar büyüklüğü 2020 yılında 3 milyar doları aştı ve 2026 yılına kadar 50 milyar dolara yakın bir orana ulaşması beklenmektedir. İnşaat sektöründe teknolojik otomasyon açısından dördüncü sanayi devriminin umut verici ve önemli bir unsuru olan DT yaklaşımı hem yükleniciler hem de sahipleri için tasarım, inşaat ve operasyon aşamalarında zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır (Barbarosoglu and Milner, t.y.). COVID-19 salgını inşaat sektörü üzerinde büyük bir etki yaratmıştır. 2021 tarihli CHAS raporunun sonuçlarına göre katılanların neredeyse %70'si salgın döneminde projeleri durdurmuş ve %80'si projelerinin bazılarını iptal etmiş veya ertelemiştir. İnşaat eğitiminde de benzer güçlü bir etki görölebilmektedir (Dai and Brell-Çokcan, 2022). İnsanlar zamanlarının %90'ını iç mekânlarda geçirdikleri için iç ortamın insan sağlığı üzerinde önemli etkileri vardır. COVID-19 salgını ve artan halk sağlığı bilinci sağlıklı bir iç mekân ortamı geliştirme ve sürdürme aciliyetini daha da artırmıştır. BIM, veri analitiği ve akıllı kontrol dahil olmak üzere ortaya çıkan dijital ikiz teknolojilerindeki ilerleme, bina tasarımı ve işletimi için yeni fırsatlara yol açmıştır (Cai et al., 2023). Dolayısıyla da COVID-19 sonrası birçok endüstriyel sektörde temel bir teknoloji olabileceği için DT geliştirme ve uygulama ihtiyacı artmıştır.

12. Dijital İkizlerin İnşaat Sektöründe Kullanımı

Dijital ikizlerin imalat sanayinde, güvenlik alanında ve sağlık alanında giderek daha fazla benimsenmesine rağmen inşaat sektöründe dijital ikizlerin uygulanması hala gelişme aşamasındadır. BIM, IoT ile karşılaştığında birlikte çalışabilirlik en önemli zorluktur (Chen et al., 2021). Dijital ikiz kavramı zaten farklı endüstriyel uygulamalara sahiptir. İnşaat mühendisliğinde BIM ve IoT gelişmesi ve daha sonra ortaya çıkan veri miktarları nedeniyle dijital ikiz kavramı inşaat mühendisliğinde

benimsenmeye başlamıştır (Wenner et al., 2021). Önceki yapılan çalışmalar da inşaat aşamasında BIM'in çok yönlü uygulamalarının zorluklarını ve gerekliliklerini gözden geçirip vurgulayarak inşaat dijital ikizi kavramına giden yolu açmıştır (Reja, Varun and Varghese, Koshy, 2022). DT konsepti ve uygulamaları akıllı şehir ve üretim gibi çeşitli sektörlerde izleme, veri analizi ve karar alma konusunda başarılı olmuştur. Ayrıca DT, inşaat sektöründe inşaatı kolaylaştırmak için BIM, IoT ve LiDAR (Işın Algılama ve Mesafe Ölçme) gibi teknolojiler ve veri madenciliği ile entegre edilmiştir. DT çerçeveleri IoT sensörleriyle BIM'i güncellemek ve uygulama modelleri arasında uyumluluk kontrolleri gerçekleştirmek ve bilgi güncellemeleri için geliştirilebilmektedir (Zhao et al., 2021). DT tasarım aşamasında binanın içindeki aydınlatma ve hava akışını iyileştirmek amacıyla geleceğin binalarının performansını artırmak ve bina cephesinde elde edilen güneş ışığı ve rüzgârın yönlerini belirlemek için bilgilerin daha iyi kullanılması amacıyla mimar ve mühendisler tarafından kullanılabilir. DT'nin inşaat aşamasındaki rolü inşaat maliyetini verimli ve etkili bir şekilde azaltmak ve geleneksel yöntemin kalitesini artırmaktır (Kit, 2022). İnşaat sektöründe, proje verilerinin toplanması ve veri modeli senkronizasyonu BIM modelinin geliştirilmesiyle başlayıp inşaat, devreye alma ve kapanış aşamaları boyunca devam etmektedir. BIM'de kullanılan ve bir DT yaklaşımına entegre edilen en yaygın araçlar, çakışma tespiti, inşaat lojistiği planlaması, inşaat tahmini, maliyet tahmini, kalite kontrol, güvenlik yönetimi, planlama, çizelgeleme, saha izleme ve görsel iletişimidir. Bu kullanımlar DT yaklaşımının birtakım yeteneklere sahip olmasını gerektirir: tahmin, simülasyon, izleme, yaşam döngüsü uygulanabilirliği, algılama, optimizasyon, IoT ile entegrasyon, yapay zekadan yararlanma, BIM, bilgi havuzu oluşturma ve otomatik mantıksal yorumlardır. BIM geliştirmenin sektör genelinde kabul edilmesi, inşaat sektöründeki mevcut süreçleri dijitalleştirme çabalarını hızlandırmıştır. BIM, teknoloji odaklı bir süreç olarak ortaya çıkmış ve inşa edilen varlıkların tasarımı, inşası ve yönetimi sırasında karar alma sürecini iyileştirmek için çok sayıda fırsat sunmaktadır. Daha yakın zamanda, sektör ve araştırma çalışmaları büyük veri, bulut bilişim, AI, VR, AR, gelişmiş veri odaklı uygulamalarla BIM özelliklerini daha da genişletmek için olan teknolojik gelişmeler Endüstri 4.0 ve IoT'dir (Shahzad et al., 2022).

Dijital ikizler, yapay zekâ ve bilgisayar destekli mühendislik kullanarak inşaat sahaları için performansı artırmak, maliyetleri azaltmak, potansiyel riskleri azaltmak

ve tedarik zincirlerini optimize etmek için kullanılmaktadır. Dijital ikizi oluştururken iş akışı için kullanılan kavramsal alanın boyutları, veri ve bilgi alışverişinin doğru kullanımı yapay zekâ tekniklerinin entegrasyonunu kolaylaştırabilir. Dijital ikizler olgunlaşma, üretim ve operasyon yönetimi alanlarında yaygın olarak kullanılmakta inşaat, altyapı ve inşaat mühendisliği alanlarında da kullanılmaya başlanmıştır. Dijital ikiz fikir, deneyler veya simülasyonlar gerçekleştirmek ve karar alıcıların akıllarını geliştirmelerine yardımcı olmak veya otomatik karar sistemlerinin uygun çözümleri belirlemelerine yardımcı olmak gelecekteki davranışları tahmin etmek için kullanılan hedef fiziksel kuruluşun beklenen sorunları sanal kopyasının rolü etrafında oluşturulmuştur. Bir dijital ikizi inşaat projesi yönetim süreçlerinde, veri tabanına çalışmanın yürütülmesini ve yapım sonrasında hizmete alınan tesisin davranışını izleyen sensorlar aracılığıyla bilgi ve veri sağlayarak kullanılabilir. Bu şekilde veri tabanı, ideal durumu gerçekle karşılaştırma ve belirli izleme döngüleri boyunca işi izleme ve yöneticiler için gerekli rapor ve uyarıları oluşturma olanağı sağlamaktadır (Salem and Dragomir, 2022).

DT hissedarlara proje hakkında geniş bilgiler sağlayarak inşaat maliyetini azaltmak, kaliteyi artırmak ve etkili paydaş yönetimini geliştirmek için önemli miktarda veri elde etmeye yardımcı olabilmektedir. İnşaat aşamasında DT ürün ve tasarım kusurlarının üretim sırasında analiz edildiği ve tahmin edildiği kaynak yönetimi, malzeme yönetimi, program yönetimi, kalite yönetimi gibi çeşitli yönetim faaliyetlerine de yardımcı olabilmektedir. DT'deki GPS, akıllı sensörler ve sensör ağları gibi diğer ilgili teknolojiler yapılan işin tespit edilmesine, ölçülmesine, üretim ilerlemesinin izlenmesine, malzeme ve çalışan konumlarının takip edilmesine ve inşaat kalitesinin izlenmesine yardımcı olabilmektedir (Kit, 2022).

13. AEC Endüstrisinde Dijital İkiz

Endüstri 4.0'nın AEC sektörü üzerindeki etkisi giderek artmaktadır. Endüstriyel ve üretim sektöründe ortaya çıkan ve kademeli olarak yeni bina inşaatlarına ve inşa edilen ortama yayılan sürekli deneyler ve yeniliklere tanıklık etmekteyiz. Son yıllarda AEC'nin ana odak noktası, temel olarak bina sistemlerine akıllı teknolojilerin entegre edilmesiyle enerji yönetimi olmuştur. Bina otomasyon sistemi konseptinde bir evrim olmuştur. Otomatik binalar, temel performans göstergelerini gösterebilir; akıllı binalar, enerji tüketicilerini analiz edebilir; bilişsel binalara kadar, davranışları öğrenebilir. Aslında CB (Bilişsel Yapı) konsepti, algılama

teknolojileri, AI ve IoT ile entegre edilmiştir ve DT konseptiyle kesinlikle bağlantılıdır. Michael Grieves, 2002 yılında üretim bağlamında DT sözcüğünü ürettiğinden bu konsept farklı olgunluk düzeylerinde farklı alanlarda güçlendirmiştir (La Russa and Santagati, 2020).

AEC endüstrisindeki dijitalleşme çok sayıda kaynaktan veri toplama ve birleştirme sürecini ön plana çıkarmıştır. AEC endüstrisindeki dijital dönüşüm yeni veri analitiği stratejileri gerektirmektedir. Durum tahminlerini ve iyileştirmek için verileri birleştirmenin genel süreci olarak tanımlanan “veri birleştirme” kavramı herhangi bir tek veri kaynağından daha tutarlı doğru bilgi oluşturma avantajına sahiptir. Veri birleştirme araçları ham verilerden üst düzey kavrayışa bilgi akışını artırmıştır (Huang et al., 2023). AEC sektörü dijital çağı benimsedikçe inşa edilmiş varlıkların tasarımı, inşası ve işletimi ile ilgili süreçler sensör ağlarından gelen verilerin değer katan izlenmesine yönelik teknolojilerden giderek daha fazla etkilenmektedir. Bu verilerin, semantik modellerin yanı sıra mühendislik sistemlerinin simülasyonu ve optimizasyonu ile birlikte güvenli ve esnek depolama sistemlerinde yönetilmesidir (Boje et al., 2020).

AEC endüstrisinde inşaat yönetimi, varlık yönetimi ve enerji yönetimi için bazı DT çerçeveleri geliştirilmiştir. Bu çerçevelerde BIM tipik olarak bir tesis için gerçek zamanlı izleme sağlamak üzere sensör ağlarıyla birleşen bir veri tabanı görevi görmektedir. Bu verilere dayanarak bilgi madenciliği, performans tahmini ve gerçek zamanlı kontroller için yapay zekâ ve makine öğrenimi teknikleri kullanılmaktadır. Bu süreçte IFC, AEC verilerini temsil etmek için platformdan bağımsız bir dosya biçimi olduğundan değişken yazılım veya araçlar arasındaki veri birlikte çalışabilirlik sorunlarının üstesinden gelmek için genellikle IFC tabanlı BIM modelleri kullanılmaktadır (Cai et al., 2023). AEC'de veriler genellikle heterojen kaynaklardan (gereksinimler, simülasyonlar, sensörler, bina yönetim sistemleri vb.) elde edilmekte ve mevcut BIM modelleriyle ilişkili olması gerekmektedir; proje modelleri ve belgelerle ayrıca geçici boyutla tutarlı olmalıdır. 3D BIM gerçek zamanlı görselleştirme AEC sektöründeki (ve ötesinde) birçok araştırmacı arasındaki iletişim gereksinimleri nedeniyle ortaya çıkmaktadır. IoT devreye alma işlemini yerleşik ortama entegre etmek ve kullanıcı ara yüzlerini geliştirme inşaat sektöründe büyük bir zorluktur. Bu nedenle, BIM'in tam potansiyelini deneyimlemek ve sürekli artan kullanıcı taleplerini

karşlamak için BIM teknolojilerini destekleyen diğer teknolojiler de uygulanmalıdır (Relekar et al., 2021).

Yeni binalar artık bir dizi sensörle donatılmıştır; yani binalara giden IoT cihazları akıllı bina olarak tamamen otomatik hale getirilmiştir ve AEC sektöründeki paydaşlar artık akıllı binaların dijital ikizinin devreye alınması konusunda giderek artan bir ilgi göstermektedir. DT bir sistemin durumunu ve zaman içindeki gelişimini tanımlayabilecek bir veri seti olarak ayarlanmıştır. IoT ve BIM geliştirmenin ilerlemesi hem inşaat hem de evrim binası aşamalarında iş birliği çalışmalarını kolaylaştırarak AEC endüstrisinde DT'nin daha iyi elde edilmesini hızlandırabilmektedir (Kit, 2022).

14. Enerji Sistemlerinin Dijitalleşmesi

DT, enerji sistemlerinin verimliliğini ve yönetimini artırmanın önemli bir unsurudur. Enerji sistemlerinin dijitalleşmesi enerji sektörünün geleceğini temsil eder ve dijital ikizler gelecek çözümler gibi karmaşık bir sistemi izlemek ve en iyi şekilde yönetmek için en gelişmiş ve eksiksiz yolu temsil eder. Günümüzün enerji sistemi mimarisi tüketim ve RES (Yenilenebilir Enerji Kaynakları) penetrasyonu için büyük bir elektrifikasyon elde etme yolunda ilerlemektedir. Bu bağlamda talep ve üretim açısından ifade edilen enerji akışlarının izlenmesi ve koordine edilmesi için teknik unsurlara güvenmek çok önemlidir. Gerçek dünyada bu teknoloji sistemde kurulu olan ve herhangi bir zamanda farklı dalgalanmaları analiz etmek için adanmış veri tabanları ve algoritmaları besleyen bir sensör dizisine dönüştürülebilir. Enerji sisteminin daha iyi izlenmesi ve anlaşılmasının yanı sıra inşaat sektöründeki akıllı ölçüm ve IoT cihazlarının varlığı son yıllarda yaygınlaşmakta ve önümüzdeki yıllarda da büyümeye devam etmesi beklenmektedir (Lamagna et al., 2021).

Binaların enerji verimliliğinin enerji performans sertifikası kullanılarak sınıflandırılması bina enerji değerlendirme performans topluluğu için yaygın bir uygulama oluşturmaktadır. Bu alanda binaların enerji performansının hesaplanması olan varlık derecelendirmesidir oysa bir binanın enerji sınıfının tanımlanması için başka bir seçenek operasyonel derecelendirme adı verilen ölçülen performansına dayanmaktadır. Akıllı sensörler ve akıllı binalar alanında önemli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen BIM veya dijital ikizler gibi Endüstri 4.0 uygulamalarının kullanımına ilişkin etkin çözümler binaların operasyonel derecelendirmesinde kullanılmamaktadır (Spudys et al., 2023). Yerleşik ortam alanı iklim, karbon ve

dairesel ekonomi sonuçlarını analiz etmek için dijital ikizleri kullanır ve enerji kullanımı, hava kirliliği ve su kalitesinin yerleşik ortam kesintileri sırasında çeşitli durumların izlenmesine ve analiz edilmesine yardımcı olmak için bu sistemi geliştirmiştir. Olağanüstü hava koşulları kondisyonları, felaketin görünürlüğü ve şehir etkileşimine dayanarak, karar alıcılar, yerleşik çevre felaketindeki çeşitli durumları ve insanlar üzerindeki etkiyi izleyebilmekte ve analiz edebilmektedir. Ayrıca, topluluk üyeleri, gönüllü müdahale ekipleri, vatandaşlar ve diğer paydaşlar için felaket ve toplum afet yönetiminde yerleşik ortamın yok edilmesiyle başa çıkabilme becerisini de geliştirebilmektedir (Zhang et al., 2022).

BIM ve DT teknolojisinin birleştirilmesi inşaat ve operasyon aşamalarında konut binalarında enerji talebini önemli ölçüde azaltabileceği gibi şeffaflığı ve iş birliğini artırırken de işlem ve onay döngülerini azaltabilmektedir. BIM iş birliğinin projelerin oluşturulmasında kritik rolü göz önüne alındığında üretkenliği ve verimliliği artıran BIM etkin projelerdeki iş birliği sürecini anlamamız çok önemlidir (Zhao et al., 2021). BIM enerji tüketimi analizi farklı malzemeleri karşılaştırabilir, çeşitli malzemelerin performansını inceleyebilir ve bina yapısının bakımı için en uygun ve enerji açısından en verimli malzemeleri seçebilmektedir (Wang et al., 2022).

15. Avantaj ve Dezavantajları

a) Avantajları

Bilgi teknolojisinin ve IoT'nin hızla yayılması ve sensörlerin, iletişim ağlarının ve analiz yazılımlarının kullanılabilirliği göz önünde bulundurulduğunda artık inşaat projesi yönetimi de dahil olmak üzere çeşitli alan ve sektörlerin birçok ilgi alanında dijital ikiz sistemler geliştirmek mümkündür (Salem and Dragomir, 2022).

DT'nin avantajı sistemi uygun sensörler ve iletişim ile sürekli olarak izleme olanağı sunmaktadır. Bu durumda DT'nin gerçek sisteminin beklendiği gibi bir giriş tepki verdiğini kontrol etmesini sağlamaktadır. Aksi takdirde kontrol sistemi otomatik olarak farklı bir kontrol stratejisi gerekmektedir (Lamagna et al., 2021).

DT yaklaşımının diğer potansiyel avantajları arasında tasarım odaklı akıllı planlama ve yapı ile optimize tasarım yaratıcılığı yer alır. Dijitalleşme çağında dijital bilgi alışverişinin miktarı, sıklığı ve kalitesi iş birliğinin başlıca ölçüsüdür. Gerçek zamanlı bilgi alışverişi sunarken DT yaklaşımının iş birliği etkinliği seçilen DT mekanizmasının bilgi alışverişi altyapısına bağlı olarak farklı olabilmektedir. DT

yaklaşımındaki bilgi alışverişi dosya tabanlı, bulut tabanlı ve blok tabanlı ağırlıklı olabilmektedir (Barbarosoglu and Milner, t.y.)

DT'nin faydalı yönlerinden biri de iş birliğidir. Dijital ikiz, müşteriler ve tasarımcılar arasındaki iletişime olanak sağlayacaktır. Aslında dijital ikiz, fiziksel ürünün aslına uygun bir eşlemesidir ve gerçek zamanlı iletim verilerini kullanarak müşteriler ve tasarımcılar arasındaki iletişimi daha şeffaf ve daha hızlı hale getirebilmektedir (Tchana et al., 2019). Fiziksel ürünlerden elde edilen gerçek zamanlı veriler gerçek dünyayı sanal parçalara hizalamanın temelidir. Sorunları otomatik olarak tespit ederek ve performansı önceden değerlendirerek, optimize edilmiş çözümler veri odaklı bir şekilde formüle edilebilir ve gelişmiş güvenilirlik ve verimliliğin faydalarını sağlamak için zamanında devreye alınabilmektedir (Pan and Zhang, 2021).

Dijital ikizin stratejik faydaları arasında daha düşük ve daha öngörülebilir inşaat maliyetleri, daha hızlı onay döngüleri ve daha fazla müşteri/kullanıcı memnuniyeti yer almaktadır. Proje ekonomisini önemli ölçüde iyileştirebilirler. İleriye dönük olarak dijital ikiz teknolojisini gerçek zamanlı insan odaklı veri setleri ile yenilikçi bina ve süreç tabanlı BIM sistemlerinin bir birleşimidir (Reja, Varun and Varghese, Koshy, 2022). Maliyet azaltma, genel giderleri başarılı bir şekilde azaltmak ve imalat endüstrisi kaynaklarını korumak için bulut sistemiyle entegre edilen bu tür temel avantajlardan biridir. Maliyet azaltmanın yanı sıra fiziksel modeller dijital varlıklarla değiştirilebildiğinde risk değerlendirmesi ve azaltma risksiz bir ortamda dijital olarak gerçekleştirilebilmektedir (Visartsakul and Damrianant, 2023).

Dijital ikiz kullanmanın en önemli avantajlarından biri arızaları önceden tahmin edebilmek ve bu arızalardan kaçınmak için çözümler önermektir (Sun and Liu, 2022).

Dijital ikiz modellerden toplanan veriler acil durum, kriz planlaması ve varlıkları yönetmek için kullanılabilir. Dijital ikiz modellerden elde edilen veri güncellemeleri, sorunları ve kısıtlamaları fiziksel varlığın koşullarını tahmin etmek, enerji tüketimini tahmin ederken çevre yasalarını korumak, altyapı varlıklarının yapısal sağlığını izlemek ve yapısal ömrü tahmin etmek gibi çeşitli paydaşlara aktarmaya yardımcı olmaktadır (Feng et al., 2021).

Dijital ikiz, BIM ve GIS temeli olarak kullanır çünkü BIM ayrıntılı geometri, programlama, miktarlar ve modül özellikleri içerebilir, GIS ise coğrafi konum verilerini ulaşım bilgileri (örn. Trafik ve düzenleme) ile sağlar ve bunların tümü lojistik simülasyonu için önemlidir. Ardından, dijital ikiz fiziksel varlığından (örn. Modül) gerçek zamanlı IoT sensör verileri (örn. GPS) toplar, potansiyel lojistik risklerini tahmin etmek için verileri simüle eder, analiz eder ve doğru tahmini varış zamanlarına sahip alternatif teslimat rotalarını bulmaktadır. Bu tür proaktif risk algılama ve doğru teslimat tahmini lojistik belirsizlikleri en aza indirir ve böylece daha üretken modüler projeler için etkili tedarik zinciri koordinasyonunu kolaylaştırmaktadır. Dijital ikizlerin yapıdaki önemli potansiyel avantajlarından biri daha fazla ‘canlı’ bilgi paylaşımı için BIM ve GIS’yi tamamlamaktır. Dijital ikizler BIM ve GIS’yi temel olarak kullanabilir ancak çalışanlar, malzemeler, ekipmanlar, sistemler ve süreçler gibi tüm varlıkları da içermektedir (Lee and Lee, 2021).

Bina ve altyapıların yaşam döngüsü yönetimine yönelik uygulamaları sosyal ve ekonomik avantajları daha da artırabilmektedir. Dijital ikiz, ortaya çıkan risklere yönelik güvenlik açığı, potansiyel çözümleri göstermek, yaşam döngüsü maliyeti ve karbon ayak izi ile uygunluğu değerlendirmek için kullanılabilir (Kaewunruen et al., 2020).

b) Dezavantajları

Teknolojik ilerlemenin eksikliği nedeniyle engel teşkil eden bir sektörde inşaat yavaş yavaş dijitalleşiyor ancak gerçek dijital dönüşüm gerçekleşmeden önce çözülmesi gereken birçok zorluk vardır. Zorluklar satın alma aşamasında başlayarak proje ve varlık yaşam döngüleri boyunca devam etmektedir (Li et al., 2019).

Farklı kullanım amaçlarına sahip çok çeşitli kaynak sistemlerinden gelen veriler göz önünde bulundurulduğunda bir sorun teşkil eder ve elde edilen veriler bu uygulamaların gerekliliklerine uygun olmayabilmektedir. Bu çatışmalarla başa çıkmak ve kaynak sistemlerdeki verileri yeniden amaçlamak büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Tüm verileri birleşik ve esnek bir şekilde yönetmeyi hedefleyen dijital ikiz gelişimi için AEC ve FM sektörleri için özel bir mimarinin tanımlanması gerekmektedir (Lu et al., 2022).

DT kadar karmaşık bir ağın yönetimi iletişim protokolleri, gerçek zamanlı süreçler ve analizler, güvenlik ve gizlilik gibi çeşitli nedenlerle ve büyük veriyle (örn.

yönetim, depolama, gizlilik ve güvenlik) bağlantılı tüm zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Çeşitli giyilebilir sensörler, akıllı telefonlar, tabletler ve diğer cihazların kullanılması akıllı sensörler DT'nin farklı bağlamlarda kabul edilmesini hızlandırabilmektedir. Bu cihazların arasında veri tanecikliği, birlikte çalışabilirlik, bilgi heterojenliği, çoklu kaynak bilgileri ve veri formatı, veri örnekleme aralıkları, veri güvenliği ve güven gibi birçok özellikte zorluklar görülebilmektedir. Bu sorunların sektörün DT'den faydalanmaya hazır olma durumunu artırmak için çözülmesi gerekmektedir (Lamagna et al., 2021).

Dijital ikiz modeller paydaşların karar alma süreçlerini iyileştirebilse de mevcut uygulamalarda veri entegrasyonu ve veri güvenliğiyle ilgili birçok zorluk hala mevcuttur. Dijital ikiz modeller bunları oluşturmak için doğru becerilere sahip kişilere büyük miktarda kaynağa ve bunları başarılı bir şekilde geliştirmek için daha yüksek bilgi işlem gücüne sahip en son teknolojilere ihtiyaç duymaktadır (Feng et al., 2021).

Tüm sistemin ve ilişkilerinin görselleştirilmesine, fiziksel modelin sonuçlarının kontrol edilmesi ve operasyonlar, güvenlik ve bakım dahil işlemlerin doğruluğunun ve dijital modele komut veren tamamen geliştirilmiş yapay zekayı doğrulamaya kadar önemli sayıda zorluk devam etmektedir (Salem and Dragomir, 2022).

Dijital ikiz birçok avantaj sunmakla birlikte bir takım güçlükleri de mevcuttur ve bunlar arasında güvenlik tehdidi de başlıktır. Şu anda siber güvenliği yerleşik ortam için tasarlanan uygulamalarda kullanılacak dijital ikizlere yüklemeye çalışırken farklı zorluklar bulunmaktadır. Bu nedenle gerçek ikizleri koruyabilen ve tanımlayabilen dijital ikizler için bir ihtiyaç vardır (Alshammari et al., 2021).

Dijital ikiz model zengin veri analizleri için yapay zekayı kullanarak BIM ve GIS uygulamalarının zorluklarını ortaya çıkarabilmektedir. Dijital ikizler modüler yapımda BIM ve GIS ile birlikte lojistik alanında uygulanırsa olası lojistik risklerini tahmin etmek ve gerçek "tam zamanında" teslimat için daha doğru teslimat rotaları ve varış sürelerini tahmin etmek için farklı lojistik senaryolarını gerçek zamanlı olarak izleyebilmekte ve simüle edebilmektedir. Bilgi kaybı konusunda endişelenmeden BIM ve GIS kullanarak dijital bir ikizde lojistik simülasyonu yapmak için bir yöntem gerekmektedir (Lee and Lee, 2021).

IoT Şu anda gelişmekte olan ve ilerleyen bir teknolojidir ve genel olarak pek çok zorlukla karşı karŐıyadır. Güvenlik, IoT'nin genel olarak karŐılaŐtıđı en önemli zorluklardan biridir ve güvenliğin yanı sıra gizlilik de IoT'nin bir diğer önemli sorunudur. IoT zellikli BIM zmleri bağlamında gizlilik sorunları bu sistemlerin yaygınlaŐmasına ciddi zarar verebilmektedir. Bunun nedeni inşaat sektörünün doğası gereği parçalanmıŐ olması ve genellikle farklı tarafların bu sektörde yer almasından kaynaklanmaktadır. BIM merkezli IoT uygulamalarına özel başka zorluklar da vardır. Örneğin BIM ile IoT arasında sorunsuz bir entegrasyon oluŐturmanın başlıca zorluklarından biri Şu anda IFC gibi BIM veri gösterimi için kullanılan Őemalar ile sensör verilerini temsil etmek için kullanılan çeşitli IoT standartları arasındaki boŐluđu doldurmaktır (Shahinmoghadam and Motamedi, 2019). En büyük zorluk farklı biçimlerde birden fazla teknoloji kaynağından gelen verilerin entegrasyonu olmaya devam etmektedir. Dijital ikiz verilerin fiziksel varlıktan dijital kopyaya gerçek zamanlı olarak aktarılmasını gerektirmekte bu da önemli bir maliyet ve zamana ihtiyaç duymaktadır. Dijital ikiz modeller siber tehditlere maruz kalmaktadır. Bu nedenle veri koruması ve gizlilik kilit nceliklerdir (Feng et al., 2021).

Dijital ikizlerin uygulanmasının önündeki zorluklar teknolojinin kullanılabilirliği ve dijital ikizleri oluşturan teknolojik sistemlerin karmaşıklığı, ortak veri standartları ve araçlarının eksikliği, veri güvenliği ve sahiplik, iş gücü st üste dizilmesi ve sistemsel kültürel deđiŐimin gerekliliğiyle ilgilidir. Dijital ikizler ile BIM arasında geliştirme ve benimseme sürecinde zilen benzerlikler dijital ikizlerin BIM'in geliştirilmesinde karŐılaŐılan zorluklardan ders alabileceği anlamına gelmektedir (Shahzad et al., 2022).

III. YÖNTEM

Literatür araştırması, tabakalı örnekleme yöntemi ile örneklem seçilmiştir. REVİT programının öğrenci versiyonu kullanılarak 3D model oluşturulması, model simülasyonu, modelin test edilmesi vs. ile örnek bir model oluşturularak karşılaştırılmıştır.

IV. 3D MODEL

REVİT yazılımı BIM uygulamaları için en yaygın kullanılan yazılımlardan biridir. Doğrudan yazılımda 3D modeller oluşturabilir veya kolay kullanım için 3D modeller oluşturmak üzere 2D CAD teknik resimlerini içe aktarabilmektedir. Bu nedenle BIM tabanlı bilgi yönetimi çerçevesinin özü farklı aşamalar arasında ve BMI (BIM Olgunluk Endeksi) aracılığıyla katılımcılar arasında bilgilerin etkili bir şekilde entegre edilmesidir.

İlk olarak bu çalışmada modellenecek proje belirlenmiştir. Bu yönde, <https://www.houseplans.com/collection/design-styles> linkinden herhangi bir proje seçilmiştir. Bu projede 3D modelleme kapsamında binanın duvarları, kolonları, kirişleri ve merdivenleri yapısal (betonarme) kısımları REVİT programında modellenmiştir. Ayrıca, mimari detaylar (örneğin, alçı, boya, duvarlar için kaplamalar, döşeme için şap, laminat, seramik vb.) ve mobilyalar da modellenmiştir.

<https://www.houseplans.com/collection/design-styles> sitesinden seçilen proje Plan: 1066-165 (stil: modern).

Link: <https://www.houseplans.com/plan/4482-square-feet-4-bedroom-4-5-bathroom-3-garage-contemporary-sp295519>

Sitede seçilen evin 3D görünümü aşağıdaki şekil 11’de gösterilmektedir.



Şekil 11 Sitede Seçilen Evin 3D Görünümleri

Sitede bulunan ana ve ikinci kat planı görüşleri şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 12 Sitedeki Ana ve İkinci Kat Planı Görüşleri

Seçilen ev toplamda 733 m²'dir ve 2 kattan oluşmaktadır. 2 oturma odası, 1 mutfak, 1 çalışma odası, 1 erzak odası, 5 yatak odası, 1 giyinme odası, 4 banyo, 1 WC, 1 çamaşır odası, 1 ütü odası, 3 garaj ve 1 ön sundurma bulunmaktadır. Kapılar, pencereler ve mobilyalar www.BIMobject.com sitesinden seçilmiştir.

Projede kullanılan mimari ve yapısal unsurlar aşağıdaki gibidir:

- Temel: 50 cm Radye Temel (Malzeme: Betonarme)
- Döşeme: 15 cm (Malzeme: Betonarme)

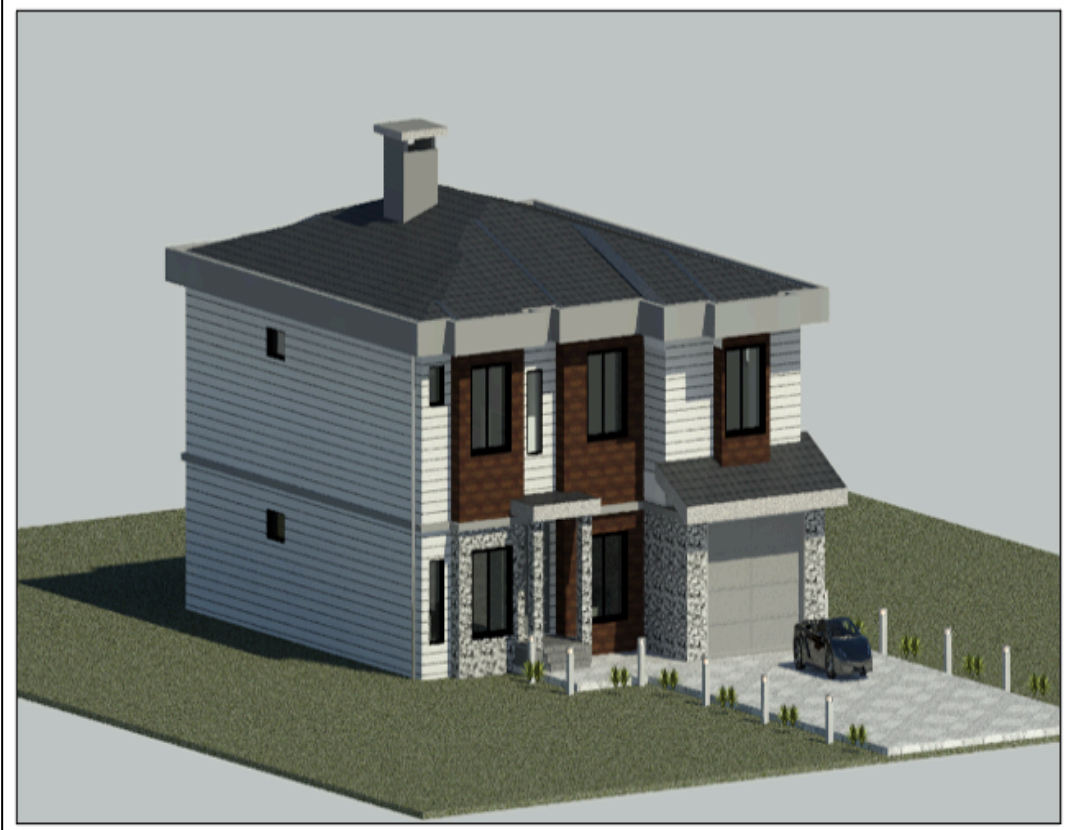
- Kolon: 30x30 cm (Malzeme: Betonarme)
- Kiriş: 25x45 cm (Malzeme: Betonarme)
- Perde duvar: 30x275 cm ve 30x357 cm (Malzeme: Betonarme)
- Çatılar: 33.30 cm Sıcak Çatı (Malzeme: Beton)
- Ana ve ikinci katlar için zemin: 7 cm (Malzeme: Laminat parke ve ıslak hacimlerde seramik)
- Duvarlar: 33 cm Dış duvar ve 22 cm iç duvarlar (Malzeme: Ytong)
- Sundurma ve garaj zemin: Zemin betonu ve taş kaplama 7 cm (Malzeme: Taş)
- Kapılar: Çelik kapı, iç kapı, garaj kapısı
- Pencereleler: Ticari alüminyum mağaza penceresi

Yukarıda belirtilen siteden seçilen yapıya dayanarak ilk olarak akslar oluşturulmuştur. Sonra ana ve ikinci kat planları çizilmiş ve çatı oluşturulmuştur. Daha sonra, modele ön ve arka sundurmalar ve çatıları eklenmiştir. Kapılar ve pencereler model ile uyumlu olarak yerleştirilmiştir ve mobilyalar da www.BIMObject.com 'dan alınmıştır.

Oluşturulan modelin tüm aşamalarının uygulanmasıyla oluşan 3D modelin render görüntüleri şekil 13 ve şekil 14'deki gösterilmektedir.



Şekil 13 Modelin Ön ve Arkadan Görünüşü

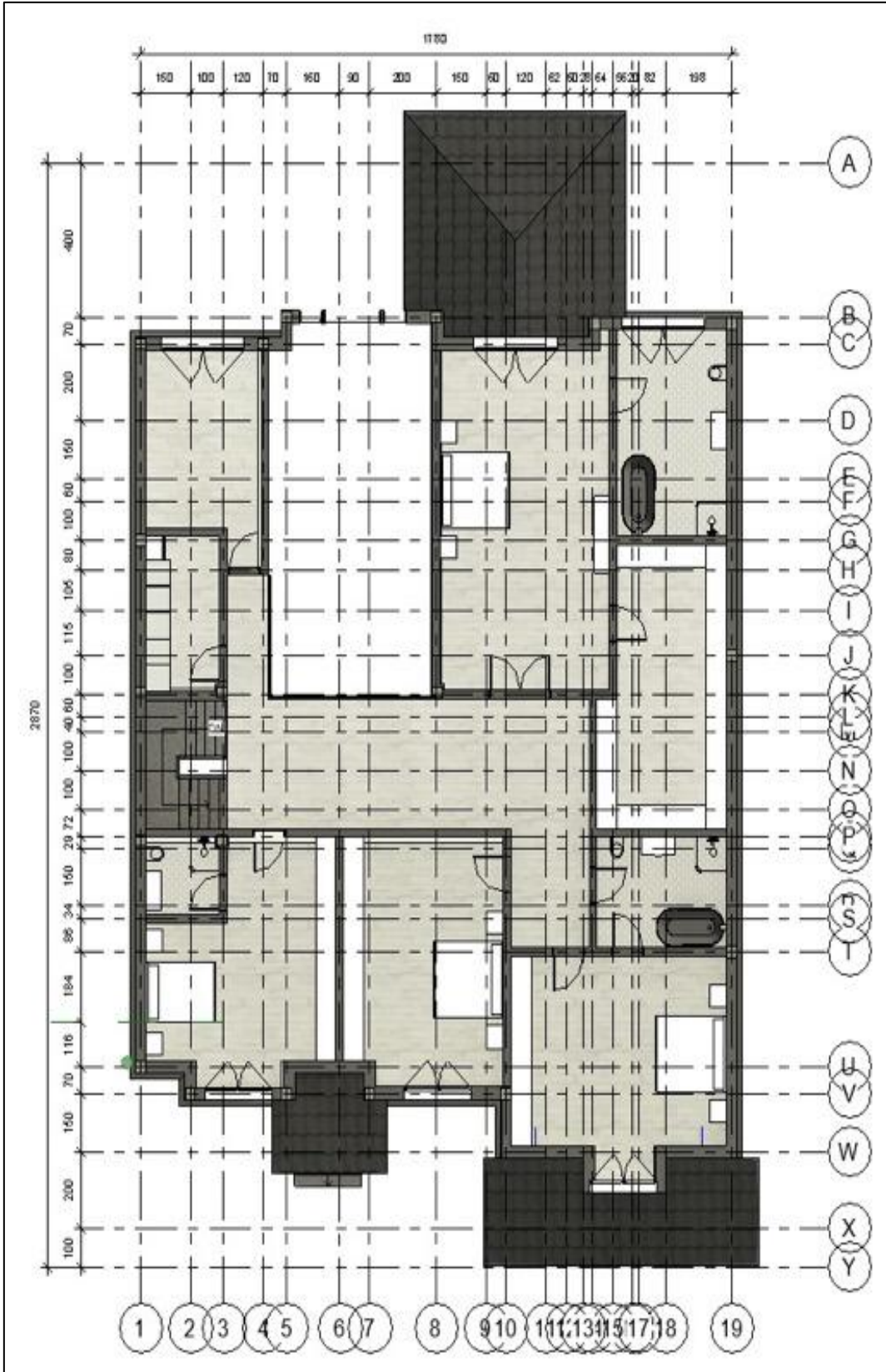


Şekil 14 Modelin Yanlardan Görünüşü

Revit'te oluşturulan 3D modelin ana ve ikinci kat planları aşağıdaki şekil 15 ve şekil 16'da boyutları (birim: cm) ile gösterilmiştir.



Şekil 15 Ana Katın Planı



Şekil 16 İkinci Katın Planı

Yapının dış duvar katmanları ve kaplamalarına göre gri ahşap, kahve ahşap ve taş olarak şekil 17, şekil 18, şekil 19'da ve şekil 20'de de iç duvar katmanları gösterilmiştir.

Edit Assembly

Family: Basic Wall
Type: DIŞ DUVAR (GRİ AHŞAP)
Total thickness: 33.00 (Default)
Resistance (R): 1.9058 (m²·K)/W
Thermal Mass: 3.41 kJ/(m²·K)

Sample Height: 600.00

Layers

EXTERIOR SIDE						
	Function	Material	Thickness	Wraps	Structural Material	Variable
1	Finish 1 [4]	Siding, Clapboard	2.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Finish 1 [4]	SIVA	3.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Membrane Layer	Air Infiltration Barrier	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Thermal/Air Layer [3]	EIFS, Exterior Insulation	4.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Core Boundary	Layers Above Wrap	0.00			
6	Structure [1]	YTONG DUVAR	20.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Core Boundary	Layers Below Wrap	0.00			
8	Finish 2 [5]	SIVA	3.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Finish 2 [5]	BOYA	1.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

INTERIOR SIDE

Insert Delete Up Down

Default Wrapping
At Inserts: Do not wrap
At Ends: None

Modify Vertical Structure (Section Preview only)
Modify Merge Regions Sweeps
Assign Layers Split Region Reveals

<< Preview OK Cancel Help

Şekil 17 Gri Ahşap Kaplamalı Dış Duvarın Katmanları

Family: Basic Wall
Type: DIŞ DUVAR (KAHVE AHŞAP)
Total thickness: 33.00 (Default) Sample Height: 600.00
Resistance (R): 1.8502 (m²·K)/W
Thermal Mass: 31.58 kJ/(m²·K)

Layers

EXTERIOR SIDE						
	Function	Material	Thickness	Wraps	Structural Material	Variable
1	Finish 1 [4]	Walnut	2.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Finish 1 [4]	SIVA	3.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Membrane Layer	Air Infiltration Barrier	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Thermal/Air Layer [3]	EIFS, Exterior Insulatio	4.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Core Boundary	Layers Above Wrap	0.00			
6	Structure [1]	YTONG DUVAR	20.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Core Boundary	Layers Below Wrap	0.00			
8	Finish 2 [5]	SIVA	3.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Finish 2 [5]	BOYA	1.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

< INTERIOR SIDE >

Insert Delete Up Down

Default Wrapping
At Inserts: Do not wrap
At Ends: None

Modify Vertical Structure (Section Preview only)
Modify Merge Regions Sweeps
Assign Layers Split Region Reveals

<< Preview OK Cancel Help

Şekil 18 Kahve Ahşap Kaplamalı Dış Duvarın Katmanları

Edit Assembly ✕

Family: Basic Wall
Type: DIŞ DUVAR (TAŞ)
Total thickness: 33.00 (Default) Sample Height: 600.00
Resistance (R): 1.7391 (m²·K)/W
Thermal Mass: 1.53 kJ/(m²·K)

Layers

EXTERIOR SIDE						
	Function	Material	Thickness	Wraps	Structural Material	Variable
1	Finish 1 [4]	Kabartmalı Tas	2.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Finish 1 [4]	SIVA	3.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Membrane Layer	Air Infiltration Barrier	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Thermal/Air Layer [3]	EIFS, Exterior Insulati	4.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Core Boundary	Layers Above Wrap	0.00			
6	Structure [1]	YTONG DUVAR	20.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Core Boundary	Layers Below Wrap	0.00			
8	Finish 2 [5]	SIVA	3.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Finish 2 [5]	BOYA	1.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

INTERIOR SIDE

Default Wrapping

At Inserts: At Ends:

Modify Vertical Structure (Section Preview only)

Şekil 19 Taş Kaplamalı Dış Duvarın Katmanları

Edit Assembly

Family: Basic Wall
Type: İÇ DUVAR
Total thickness: 22.00 (Default)
Resistance (R): 0.0000 (m²·K)/W
Thermal Mass: 0.00 kJ/(m²·K)

Sample Height: 600.00

Layers

EXTERIOR SIDE

	Function	Material	Thickness	Wraps	Structural Material	Variable
1	Finish 2 [5]	BOYA	1.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Finish 2 [5]	SIVA	3.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Core Boundary Layers Above Wrap 0.00					
4	Structure [1]	YTONG DUVAR	14.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Core Boundary Layers Below Wrap 0.00					
6	Finish 1 [4]	SIVA	3.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Finish 1 [4]	BOYA	1.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

INTERIOR SIDE

Insert Delete Up Down

Default Wrapping
At Inserts: Do not wrap
At Ends: None

Modify Vertical Structure (Section Preview only)
Modify Merge Regions Sweeps
Assign Layers Split Region Reveals

<< Preview OK Cancel Help

Şekil 20 İç Duvarın Katmanları

Şekil 21’da çatı katmanları gösterilmiştir.

Edit Assembly

Family: Basic Roof
Type: Warm Roof - Concrete
Total thickness: 33.30 (Default)
Resistance (R): 1.6812 (m²·K)/W
Thermal Mass: 468.51 kJ/(m²·K)

Layers

	Function	Material	Thickness	Wraps	Variable
1	Finish 1 [4]	Roofing, Slate	3.80	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Thermal/Air Layer [3]	Rigid insulation	5.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Thermal/Air Layer [3]	Asphalt, Bitumen	2.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Membrane Layer	Roofing Felt	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Core Boundary	Layers Above Wrap	0.00		
6	Substrate [2]	Concrete, Sand/Cemen	5.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Structure [1]	Concrete, Cast In Situ	17.50	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Core Boundary	Layers Below Wrap	0.00		

Insert Delete Up Down

<< Preview OK Cancel Help

Şekil 21 Çatının Katmanları

15cm döşeme üzerine yapılan 7cm laminat parke, seramik ve garaj zeminine uygulanan taş zemin kaplamalarının katmanları Şekil 22, Şekil 23 ve Şekil 24’de gösterilmiştir.

Edit Assembly ×

Family: Floor
Type: Laminat parke
Total thickness: 7.00 (Default)
Resistance (R): 0.0556 (m²·K)/W
Thermal Mass: 15.03 kJ/(m²·K)

Layers

	Function	Material	Thickness	Wraps	Structural Material	Variable
1	Finish 1 [4]	Wood Flooring	1.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Finish 1 [4]	Yapıştırıcı	1.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Core Boundary	Layers Above Wra	0.00			
4	Finish 1 [4]	Şap	5.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Core Boundary	Layers Below Wra	0.00			

Şekil 22 Laminat Zemin Kaplamanın Katmanları

Edit Assembly ×

Family: Floor
Type: Seramik
Total thickness: 7.00 (Default)
Resistance (R): 0.0034 (m²·K)/W
Thermal Mass: 23.10 kJ/(m²·K)

Layers

	Function	Material	Thickness	Wraps	Structural Material	Variable
1	Finish 1 [4]	ıslak hacim seramik	1.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Finish 1 [4]	Yapıştırıcı	1.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Core Boundary	Layers Above Wrap	0.00			
4	Finish 1 [4]	Şap	5.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Core Boundary	Layers Below Wrap	0.00			

Şekil 23 Seramik Zeminin Kaplama Katmanları

Edit Assembly

Family: Floor
Type: Taş zemin
Total thickness: 7.00 (Default)
Resistance (R): 0.0034 (m²·K)/W
Thermal Mass: 23.10 kJ/(m²·K)

Layers

	Function	Material	Thickness	Wraps	Structural Material	Variable
1	Finish 1 [4]	Taş zemin	1.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Finish 1 [4]	Yapıştırıcı	1.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Core Boundary	Layers Above Wrap	0.00			
4	Finish 1 [4]	Şap	5.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Core Boundary	Layers Below Wrap	0.00			

Insert Delete Up Down

<< Preview OK Cancel Help

Şekil 24 Taş Zemin Kaplamanın Katmanları

V. BULGULAR VE TARTIŞMA

Dijital ikizin tanımı BIM'e benzese de bu iki kavram arasında farklılıklar vardır. BIM ve dijital ikiz bazı benzerlikleri paylaşırsa da tesis yaşam amacı, teknolojisi, kullanıcıları ve aşamaları bakımından farklıdır. Spesifik olarak BIM statik bilgilerle çalışırken dijital ikiz gerçek zamanlı bilgilerle çalışmaktadır (Visartsakul and Damrianant, 2023). BIM, projenin tasarım aşamasında mimarlar/mühendisler tarafından çakışma analizleri ve malzeme alma işlemleri gerçekleştirmek için ve yükleniciler tarafından üretim kontrolü, yapı analizi, alan ve güvenlik yönetimi gerçekleştirmek için kullanılırken gerçek zamanlı verilerle çalışmamaktadır. Ancak dijital ikiz, gerçek zamanlı parametreleri analiz ederek fiziksel varlığı izlemek ve operasyonel verimliliğini artırmak için kullanılmaktadır (El Jazzer et al., 2020). BIM, dijital ikiz değildir çünkü dijital ikiz bir öge dinamik ağa bağlanabilir bir model ve gerçek dünyayla kalıcı bir bağlantıya sahiptir. BIM, manuel müdahale olmadan değiştirilemeyen ve ağa bağlanamayan statik modellerdir. BIM, bakım yönetimi bağlamında kullanılabilirliğini sınırlayan ancak dijital ikizlerin vazgeçilmez temeli olan gerçek zamanlı operasyonel reaksiyonlar için tasarlanmamıştır (Wenner et al., 2021). BIM'nin temel amacı gerçek bir ögenin 3D modelini oluşturmaktır. Dijital ikizin önemli işlevi ise onun yansıttığı şeye benzemesidir. Bir varlığın kullanım ömrü boyunca şirket içinde veri ve bilgi alışverişinde bulunmak diğer dijital ikiz simülatörler ve programlarla veri alışverişinde bulunmak mümkündür. Bu etkileşimler dijital ikizin varlığın kullanım ömrü boyunca önemli bir karar verme kaynağı olmasını sağlamaktadır (Hosamo et al., 2022).

Dijital İkiz ile BIM arasında birkaç önemli fark vardır. Bir binanın BIM'i ile dijital ikiz arasındaki **ilk önemli fark**, eskisinin tasarım ve inşaat verimliliğini artırmak için tasarlanmış ve bina yaşam döngüsünün aşamalarında kullanılmasıdır. Buna karşın dijital ikiz bir fiziksel varlığı izlemek, operasyonel verimliliğini artırmak ve öngörücü bakım sağlamak üzere tasarlanmasıdır. **İkinci önemli fark**, BIM'nin gerçek zamanlı verilerle çalışmak için tasarlanmamasıdır ancak tasarım, inşaat, bakım görevleri ve birlikte çalışabilirlik için hala kullanılmaktadır. Bu da gerçek zamanlı kapasite

gerektirmemektedir. Dijital ikiz, fiziksel bir varlığın dijital muadili olup mevcut BIM platformunun aksine çalışmaktadır. DT, son derece doğru dijital ikiz simülasyon ve veri analizleri gerçekleştirmek üzere fiziksel bir varlığın gerçek zamanlı yapısal ve çevresel parametrelerini kaydetmek ve analiz etmek için sensör sistemleri tarafından beslenen gerçek zamanlı verilerle özel olarak çalışmaktadır. **Üçüncü fark**, her bir modelin yapısı için gereken veri türüyle ilgilidir. BIM, bir inşaat projesinin verimliliğini artırmak için maliyet tahmini ve program verilerinin entegrasyonuna uygun olsa da dijital ikiz, binanın çevre ve kullanıcılarla etkileşimini analiz etmek ve iyileştirmek için gerçek zamanlı sensör değerlerini entegre etmek üzere tasarlanmıştır. BIM, operasyonlar ve bakım için değil tasarım ve inşaat iş birliği için kullanılmaktadır. BIM, mimarlara ve yapımcılara tasarım ve inşaat sürecinde yardımcı olmak için tasarlanmıştır ve binanın çalışma modelini oluşturmaz. İşbirliğini kolaylaştırmak için geliştirilen BIM yazılımı tasarım ve inşaat süreçlerini görselleştirmek için kullanılabilir. Varlığın tasarımı ve yapısı sırasında bile eğilimler kullanıcıları anlamayı ve iş yeri deneyiminin kalitesi konusunda rekabet edilmesini tercih ederse dijital ikiz BIM yazılımının yerini almaktadır. Mevcut duruma dayalı olarak zamanında optimizasyon fikirleri sunarak DT sadece bunu yansıtmaktan çok karar verme sürecinde yardımcı olabilmektedir. Enerji tahmini, arıza tahmini ve çalışma kılavuzu gibi hizmetlerin tümü gerçek zamanlı izleme yoluyla binanın yaşam süresi servisi tarafından iyileştirilebilmektedir (Sun and Liu, 2022).

DT, yaşam döngüsü boyunca sistemleri de dahil olmak üzere yapının bir kopyasını oluşturmaktadır. Statik 3D modellerin aksine DT dinamiktir ve yapı tamamlandıktan sonra bile gelişmektedir. AI, sensörler ve IoT'lerden alınan veriler fiziksel varlığı DT olarak yansıtmak için gereken verileri sağlamaktadır. Gerçek koşullar göz önünde bulundurularak DT yaklaşımı bilgiye dayalı kararları simüle etmektedir (Barbarosoglu and Milner, t.y.). DT'ler, fiziksel ekipmanın çeşitlendirilmiş niteliklerini sanal alanlara eşlemek için tasarım araçları, simülasyon araçları, IoT cihazları ve sanal gerçeklik gibi dijital yaklaşımları uygulamakta, değiştirilebilen ve tekrar tekrar çalıştırılabilen bir dijital ayna oluşturarak operatörün anlayışını hızlandırmaktadır. DT'ler, fiziksel kısıtlamalar nedeniyle tamamlanamayan operasyonları günlük araçlara dönüştürerek insanları tasarım ve üretim süreçlerini optimize etmek için yeni yollar keşfetmeye teşvik etmektedir (Wang et al., 2022).

Caramia ve arkadaşları 2021 yılında yaptıkları çalışmada DT'nin BIM yönteminin bir evriminden daha fazlası olmadığını çünkü gerçek zamanlı veri gösterimini ve varlık bilgilerinin dinamik analizini temsil ettiğini savunmuşlardır. İki yaklaşım referans nesnesiyle ilgili olarak diğerinin tamamlayıcısıdır. BIM temel olarak tasarıma ve yapısına odaklanır, DT ise insanlarla oluşturulan ortam arasındaki etkileşimlerin analiz ve modellenmesinde kullanılan bir araçtır. BIM ayrıca bir DT'nin geliştirilmesi için önemli bir veri kaynağıdır ve bu nedenle veri almak için veri setini oluşturan gerekli bir başlangıç noktasıdır. DT, yapıların temsillerini 4D topografik anketlerle birleştirerek daha gerçekçi bir yapı modeli oluşturmakta ve binanın çevre üzerindeki etkisini tanımlamaktadır. Sezgisel ve sürükleyici bir ortam sağlayan GIS ve DT entegrasyonu tasarımcıların ve mühendislerin özellikler, hizmetler ve kamu çalışmalarının geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca CPS, literatürün DT'i evrensel olarak tanımlamadığı bir konsepttir. İki konsepti belirleme eğilimindedir ve DT'i fiziksel bir siber sistemin gerçekleştirilmesi için bir araç olarak kabul ederek gerçek dünyayı sanal dünyaya bağlayan bir köprü kurmaktadır (Caramia et al., 2021).

Kablosuz sensör ağı entegrasyonu ve veri analizi dijital ikiz oluşturmak için gereken iki bileşendir. Bir bina için dijital ikiz görselleştirme BIM veya özel bir 3D modelden alınan 3D CAD modeline dayanabilmektedir. Bir binanın dijital ikizi, varlığın gerçek zamanlı bir görünümünü oluşturmak için çeşitli sensör ağlarından yararlanabilmektedir. Bu dinamik görünüm gerçek zamanlı analizler, bilgiye dayalı karar verme, verimlilik ve konfor geliştirme olanağı sağlamaktadır (Oyarhossein, 2021).

Bir dijital ikizin BIM'i gerçek zamanlı etkinleştirme teknolojileriyle desteklemesi amaçlanmaktadır. Örneğin, sensörler, makine öğrenimi ve algoritma simülasyonunu içeren bir BIM modeli daha iyi karar vermeyi desteklerken olası gelecek senaryolarını öngören gerçek zamanlı içgörüler sağlamaktadır. Bu statik bir BIM modelinden, sensörlerden ve diğer veri toplama cihazlarından alınan dinamik verilerden türetilen ortak bir veri sistemi oluşturmayı içermektedir. Bu işbirlikçi model paydaşların hizmetler veya tesislerle kullanıcı etkileşimini geliştirmesine teknik sistemlerin performansını en üst düzeye çıkarmak için uyarıları görselleştirmesine ve daha verimli kontrol stratejileri tanımlamasına olanak tanımaktadır (Wildenauer et al., 2022).

Hem BIM hem de IoT bina, inşaat ve altyapı sektöründe giderek daha fazla kullanılmaktadır. BIM gibi teknolojilerin devrimi ve benimsenmesi inşaat sektöründe önemli bir değişime sahiptir. BIM'nin küresel olarak benimsenmesi, tasarım ve mühendislik aşamasında benimsenen BIM'nin inşaat sektöründeki inşaat teknolojisinin ilerlemesine yönelik potansiyeli ve faydası nedeniyle hızlanmaktadır. DT konseptinin vazgeçilmez parçası neredeyse gerçek zamanlı güncellemedir. BIM yalnızca yerleşik ortamın statik verilerini sağlayabilir ve ek veri kaynaklarının yardımı olmadan modellerindeki gerçek zamanlı bilgileri otomatik olarak güncelleyememektedir. IoT'nin gelişimi ile algılama cihazlarının birbirine bağlanması ve sensörler tarafından toplanan gerçek zamanlı verilerin BIM modelleri tarafından sağlanan statik bilgilerin birleştirilmesi ve entegrasyonu ile farklı platformlarda bilgi alışverişi sağlanmaktadır. BIM modellerinin gerçek zamanlı bina durumuna göre otomatik güncellenmesine ulaşmak için akıllı cihazların yardımı, görselleştirme ve BIM modellerinde mevcut olan gerçek zamanlı çevre verilerinin analizini gerektirmektedir. BIM ve IoT teknolojilerinin dijital ikiz sistemlerine entegre edilmesi inşaat sürecinin gerçek zamanlı izlenmesi ve bina iç mekân ortamının oluşturulması için tam bir double platform sağlayabilmektedir (Kit, 2022).

BIM, insanları, süreçleri ve davranışları veri kaynakları olarak kullanarak dijital ikizlere daha da fazla bağlam eklemek mümkün olacaktır (Sun and Liu, 2022). BIM, kablosuz sensör ağları, veri analizleri ve makine öğrenimi gibi çeşitli teknolojiler şu anda inşaat sektöründe dijital ikiz sistemlerinin geliştirilmesini desteklemektedir (Opoku et al., 2022). BIM teknolojisi, dijital ikizi gerçekleştirmenin bir yoludur; aynı zamanda inşaat alanının da bir araştırma noktası olup projenin tüm yaşam döngüsünün yönetimini ve analizini 3D görselleştirme yoluyla gerçekleştirebilmektedir. BIM ile oluşturulan modele sensörler, yapay zekâ ve IoT gibi teknolojilerle besleyerek dijital dönüşümü oluşmaktadır. Bu şekilde BIM'in faydaları da artırılarak daha iyi tasarlanmış yapı elde edilerek kaynak israfı önlenir ve daha verimli yapılar elde edilebilmektedir.

Çizelge 1 BIM ve DT Karşılaştırılması (Shahzad et al., 2022) (Çeviren: Sariay E.).

Özellikler	BIM	Dijital İkiz
3D modelleme-görselleştirme	√	√
Artan iş birliği	√	√
Zaman yönetimi	√	√
Bütçe yönetimi	√	√
Planlama	√	√
Proje simülasyon analizi	√	√
Veri standardizasyonu	√	√
Tasarım aşamasında büyük katkı	√	√
İnşaat aşamasında katkı	√	√
Proje yaşam döngüsü boyunca azaltılmış proje süresi ve maliyeti	√	√
İşverenler için daha iyi değer	√	√
Geliştirilmiş bina sürdürülebilirliği	√	√
Verimliliği arttırmak	√	√
İnşaat sahasında iyileştirilmiş dinamik risk yönetimi	X	√
Gelişmiş tesis lojistiği	X	√
İşletme ve Bakım (O&M) amaçları için güncellenmiş veriler	X	√
Makine öğrenimi ve otomatikleştirilmiş süreçlerin kullanımı	X	√
Kendi kendine öğrenme algoritmalarının kullanımı	X	√
Ortak/İşbirlikçi Geliştirme Ortamı (CDE)'nin gerekli kullanımı	X	√
Gerçek zamanlı bir sanal model oluşturma	X	√
Sensörler aracılığıyla canlı model güncellemeleri	X	√
Sanal ve fiziksel modeller arasında veri alışverişi (iki yönlü iletişim)	X	√
İşletme aşamasında büyük katkı	X	√
Çevre bağlamında proje simülasyon analizi	X	√
Varlıkların canlı izlenmesi	X	√
Ekipman durumu hakkında canlı ve anlık güncellemeler	X	√
Ekipman arızalarına anında müdahale	X	√
Gerçekçi kestirimci bakım	X	√
Bina kullanımını ve performansını iyileştirmek için iç görüler elde etme	X	√
Mevcut binalarda kolay uygulama	X	√

Batty (2018) çalışmasında demiryollarında dijital ikiz kullanımını incelemiştir. Çeşitli demiryolu operasyonlarından gerçek zamanlı olarak üretilen veriler vardır ve bu veriler alındığı zaman ile sisteme en yakın kullanıcıların kullanabileceği zaman arasındaki gecikme çok küçük olacak şekilde üretilmektedir. Aslında trenlere bakan operatörler trenlerin işleyişini manuel olarak düzeltebilmesine rağmen temel sistemde

oluşturulan herhangi bir sorun ile sorunu çözmek için herhangi bir önlem arasında hala gözle görünür bir gecikme vardır. Bu gecikme genellikle iyi bir düzeltici eylemi mümkün kılacak kadar kısa olmaktadır ve bunu sağlamak için çeşitli türlerde dijital ikizler mümkündür. Trenlere olan talebin, yolcuları takip eden ve onları trenlere bağlayan otomatik ödeme sistemlerini birbirine bağlayarak dijital olarak koordine edilebileceği bile düşünülmektedir. Ancak böyle bir durumda şimdiye kadar analog olarak ele alınan gerçek sistem aslında dijital ve analogun bir karışımı haline gelmekte ve böylece dijital ikiz analogun içine örülmektedir (Batty, 2018).

Kaewunruen ve Lian (2019) demiryolu makas sistemlerinde dijital ikiz destekli sürdürülebilir tabanlı yaşam döngüsüne odaklanmışlardır. Demiryolu makasları tasarım ve yapım doğası gereği karmaşık sistemlerdir. Demiryolu makasları, trenlerin yönünü değiştirmek için kullanılmaktadır. Trenin raydan çıkmasına neden olabilecek hızlı bozulmayı ve bileşen arızalarını en aza indirmek için yüksek kaliteli yapım ve bakım gerektirmektedir. Demiryolu makaslarının karmaşıklığından dolayı BIM ile mevcut uygulama entegre edilerek bakımın verimliliği ve etkinliği iyileştirilebilmektedir. Araştırmacılar bu çalışmada bir demiryolu makas sisteminin yaşam döngüsü yönetimi için dünyanın ilk 6D BIM'ini kurmuşlar ve analiz etmişlerdir. BIM (Seviye 3), Revit-2018 ve Navisworks-2018 platformlarına dayalı 6 boyutlu saha veri bilgilerini entegre etmişlerdir. Bir demiryolu makasının 3 boyutlu dijital ikizleri tüm yaşam döngüsü boyunca zaman çizelgesini, maliyetleri ve sürdürülebilirliği kapsamaktadır. BIM'in demiryolu makas sistemleri için kullanılması makas planlama ve tasarımı, imalat öncesi montaj ve lojistik, inşaat ve kurulum, işletme, yönetim ve yıkıma ilişkin genel bilgi akışını iyileştirme ve böylece daha iyi proje performansı ve kalitesi elde etme potansiyeline sahiptir. Demiryolu makas sisteminin entegre bilgilerine dayanan 6D BIM ekonomi, yönetim ve sürdürülebilirlik konularında değerlendirme yapma ve bunlar arasında bir denge sağlama yeteneğine sahiptir. Bu BIM'in bilgi paylaşımı, teknik iletişimi kolaylaştırma, tasarım kalitesini iyileştirme, tasarım hatalarını azaltma, uygulamayı hızlandırma, işi hızlandırma, inşaat süresini kısaltma, inşaat maliyetlerini düşürme, karbon verimliliğini artırma yoluyla temel faydalarını tam olarak sağlayabildiğini göstermektedir. Proje yönetimini desteklemek ve demiryolu makas sistemi yaşam döngüsü boyunca daha yüksek operasyonel verimlilik sağlamaktadır. Sonuçlar somutlaştırılmış malzeme emisyonunun özellikle üretim aşamasında üretilen karbon ayak izine ana katkıda bulunduğunu ortaya

koymaktadır. Yeniden yapılanma aşaması yaşam döngüsünün en pahalı aşamasıdır (Kaewunruen and Lian, 2019).

Reja ve Varghese (2022) yaptıkları çalışmada inşaatta proje yönetimi için dijital ikizin uygulanmasını incelemişlerdir. Dijital ikizler projelerin inşaat aşamasının verimliliğini artırmak için yüksek bir potansiyele sahiptir. Dijital ikizler, fiziksel bir varlığın yüksek kaliteli bir dijital kopyasını sunmakta ve bir proje için gereken kapsamlı verilerin algısal bir gösterimi olarak hizmet etmektedir. Dijital ikiz geleneksel tasarım, yürütme ve operasyonel süreçleri otomatikleştirip hızlandırarak inşaat projelerine yardımcı olabilmektedir. Ayrıca projenin ekonomik çevresini, fiziksel çevresini, inşaat sürecini de içermektedir (Reja and Varghese, 2022).

Kit (2022) çalışmasında AEC alanında proje yönetiminde DT uygulanmasını incelemiştir. DT kavramlar inşaat sektöründeki prekast beton elementinin üretimine aktarılabilir. Araştırma yenilikçi uyarlanabilir modüler inşaat faaliyetleri için tutarlı verilere dayanan ürünlerin, süreçlerin ve sistemlerin gerçek zamanlı olarak ağa bağlanması gerektiğini ortaya koymuştur. DT paydaşlara proje hakkında geniş bilgiler sağlayarak inşaat maliyetini azaltmak, kaliteyi artırmak ve etkili paydaş yönetimini geliştirmek için önemli miktarda veri elde etmeye yardımcı olabilmektedir. İnşaat aşamasında DT ürün ve tasarım kusurlarının üretim sırasında analiz edildiği ve tahmin edildiği kaynak yönetimi, malzeme yönetimi, program yönetimi, kalite yönetimi gibi çeşitli yönetim faaliyetlerine de yardımcı olabilmektedir. DT'deki GPS, akıllı sensörler ve sensör ağları gibi diğer ilgili teknolojiler yapılan işin tespit edilmesine, ölçülmesine, üretim ilerlemesinin izlenmesine, malzeme ve çalışan konumlarının takip edilmesine ve inşaat kalitesinin izlenmesine yardımcı olabilmektedir (Kit, 2022).

Mafipour ve arkadaşları (2022)'de yapay zekâ tabanlı yöntemler aracılığı ile mevcut köprülerin dijital ikizlerinin oluşturulmasına odaklanmışlardır. Köprüler, servis ömürleri boyunca düzenli olarak kontrol ve bakım gerektirmekte ve bu da maliyetli ve zaman alıcı bir işlemdir. Mevcut bir köprünün geometrik-semantik modelini içeren dijital ikizler çalışma ve bakım sürecini destekleyebilmektedir. Araştırmacıların yapmış olduğu bu çalışmada bakımları mevcut olan köprülerin bulunduğu yerde doğrudan gözlem yoluyla gerçekleştirilebilmektedir. Ancak bu sürecin dezavantajları vardır: 1) köprülerin bazı öğelerine kolayca erişilemez, 2) inceleme sonuçları öznel olabilir, 3) veriler olası kusurları tespit ettikten sonra yönetim basit değildir ve 4) herhangi bir kusuru veya sorunlu alanları tespit etmek mümkün

değildir. Bu DT modellerini oluşturma işlemi fotogrammetre veya lazer tarama ile oluşturulan PCD'ye (Nokta Bulutu Verileri) dayalı olabilmektedir. Ancak PCD'nin ve parametrik modellemenin anlamsal segmentasyonu zorlu bir süreçtir ve yine de DT modellemeyi desteklemek için gerekmektedir. Görsel incelemeye kıyasla bu yöntemler daha hızlıdır ve daha yüksek ölçüm hassasiyetlerine sahiptir. Bu tarama yöntemleri; ortaya çıkan nokta bulut verileri köprülerin dijital ikiz modellerini oluşturmak için kullanılabilir. Köprü'nün DT'ni mevcut yapının mevcut durumunu görselleştirmekte ve mevcut durumlarına göre öğeleri izlemek ve daha ayrıntılı analiz etmek için bir temel sağlamaktadır. Dijital ikizler ve son tarama yöntemlerinin avantajlarına rağmen PCD tabanlı dijital ikizleme yapmak kolay değildir. Bir köprü'nün DT'nini oluşturmak için ilgili köprü'nün PCD'sinin semantik olarak segmentlere ayrılmış olması gerekmekte ve örnek model parametrik modele göre oluşturulmaktadır. Bu adımların her ikisi de maliyetli ve hataya açıktır. Bu nedenle yetkililer genellikle dijital ikizlerin yüksek maliyetlerine yatırım yapmazlar ve köprüleri yönetmek için geleneksel yöntemleri tercih ederler (Mafipour et al., 2022).

Wenner ve arkadaşları (2021) Almanya'nın Hamburg şehrinde akıllı köprü üzerinde çalışma yapmışlardır. Toplumumuzdaki mevcut güçlükler konusunda güçlü bir altyapının amacı maddi sınırlamalarla ilgili gerekliliklerle uyumlu hale getirilmeli, insan ve malzeme kaynaklarını kurtarmalı ve karbon ayak izi azaltılmalıdır. Bu mevcut varlıkların hizmet ömrünü uzatarak altyapı operasyonu ve sağlamlık için mevcut ve gelecekte yüksek güvenlik gereksinimlerini koruyarak ulaşılabilir. Şu anda Almanya'daki mevcut altyapının büyük bir kısmı yüksek derecede bozulma artan trafik talepleri veya eskimiş yapısal tasarım nedeniyle yetersizdir. Mevcut bakım prosedürleri genellikle bu gelişmelere ayak uyduramamaktadır. Bu nedenle yapısal değerlendirmeyi geliştirerek ve halihazırda uygulanan reaktif bakımdan çoğunlukla dijital öngörücü bakıma geçişi sağlayarak altyapının mevcut bakım süreçlerini iyileştirmek gerekmektedir. Dijital dönüşüm ve bunun inşaat mühendisliği üzerindeki etkisi altyapı bakımında bu geçişi gerçeğe dönüştürmek için mükemmel fırsatlar sunmaktadır. Altyapı varlıklarını IoT sistemlerine bağlı iyi seçilmiş sensörlerle donatılarak ölçülen verileri toplayıp sentezleyerek ve otomatik oluşturulan verileri klasik inceleme verileriyle birleştirerek mevcut durumu tam olarak değerlendirmek ve gelişimini tahmin etmek için yeterli veri geçmişi oluşturmak mümkün olmaktadır.

Köprülerin bakımını optimize etmek için anormallikleri ve hasarları tespit etmek ve yapıyı sensörlerle izleyerek köprü durumunu analiz etmek üzere mühendislerin çalışmalarını desteklemektedir. Bu verilerin gerçek zamanlı olarak elde edilmesini sağlamak ve toplanan veri geçmişi öngörücü bakımın temelini oluşturmaktadır. Köprü yapısına uygulanan dijital ikiz bakımı optimize etmek için yenilikçi bir gelişmedir (Wenner et al., 2021).

Ding ve arkadaşları (2018) BIM ve IoT ile akıllı çelik köprü inşaatına odaklanmışlardır. Endüstri 4.0 esnekliğini ve verimliliğini artırmak için IoT teknolojilerini çelik köprü inşaatı değer zincirine uygulamak için uygun bir yol sağlar. IoT ve BIM özellikli çelik köprü yapımına akıllı çelik köprü yapımı denmektedir. Değer zinciri entegrasyonu açısından bakıldığında bir akıllı çelik köprü inşaat senaryosu üç akıllı bileşenden (yani akıllı çelik köprü, akıllı şantiye ve akıllı inşaat süreci) oluşmaktadır. Çelik köprüler, beton köprülerle karşılaştırıldığında mukavemet, esneklik, direnç, yeniden inşa olasılığı ve geri dönüşüm oranı açısından güçlü performanslara sahiptir. Özellikle geniş çapta kullanılan küçük ve orta açıklıklı çelik köprüler için köprü inşa etmek yalnızca yol altyapısının kalitesini iyileştirmekle kalmamaktadır. Bir çelik köprü inşaatı projesi beton bir köprü inşaat projesine göre nispeten daha kısa süre ve daha az saha işi gerektirmektedir. Tasarım aşamasında, özel bir durum için hızlı ve doğru bir şekilde özelleştirilmiş bir çelik köprü tasarlamak zordur fakat prefabrikasyon aşamasında fabrikalarda çeşitli çelik yapı PC (Prekast Bileşenler) üretilmekte karmaşık üretim süreçlerinin verimli ve uygun maliyetli bir şekilde nasıl yönetileceği kilit konu olmaktadır. İnşaat aşamasında PC'leri fabrikalardan şantiyelere ulaştırmak için gerçek zamanlı ulaşım planlamasından yoksun olması ve şantiye yönetiminin yalın ve akıllı olmaktan uzak olması kalite eksikliğine neden olmaktadır. İşletme ve bakım aşamasında çalışma durumunu uzaktan izlemek için gerçek zamanlı köprü verilerini toplamının birkaç yolu vardır ve bakım çalışmaları her zaman gecikmekte ve hatalı olmaktadır. Son olarak, bu aşamalardan (örneğin tasarım modeli, imalat bilgisi, nakliye durumu, inşaat ilerlemesi ve işletme durumu) heterojen verileri ilişkilendirmek için kapsamlı bir çelik köprü bilgi modelinden yoksundur ve verileri mühendislik bilgilerine dönüştürmek için verimli veri analizi yöntemlerine ihtiyaç vardır. Bu nedenle, gelişmekte olan bilgi ve iletişim teknolojileri ve yönetsel yöntemlerin akıllı çelik köprü inşa modunu teşvik

ederek bu sorunların üstesinden gelmek için çalışılması ve uygulanması gerekmektedir (Ding et al., 2018).

Lu ve arkadaşları (2020) yapıların işletmesi ve bakımına odaklanmışlardır. BIM'i uyarlayarak ve birlikte çalışabilirlik ve entegrasyonu iyileştirmek için sistemler geliştirerek, varlık yönetimi için çeşitli entegre ve kapsamlı çözümler önermişlerdir. Örneğin farklı paydaşlar arasında karar verme ve iletişim verimliliğini artırmak amacıyla bakım yapmak için vaka tabanlı bir mantık sistemini önermişlerdir. Sydney Opera binasının restorasyon ekibi etkili işletme ve bakım yönetimini desteklemek için farklı kaynakları entegre eden birleşik bir merkezi veri havuzu da tasarlanmıştır. Ancak yine de ayrıntılı bir veri yakalama ve bakım yaklaşımına sahip değildir. Bununla birlikte O&M yönetim sorunlarının izlenmesini, güncellenmesini, iletişim kurmasını ve entegre edilmesini sağlayan entegre bir akıllı platform sürekli geliştirme ve iyileştirme beklemektedir. Varlık yönetiminin O&M aşamasında etkinliği varlık koşulları ve performansları, güvenilir iletişim kanalları ve önceki deneyimlerden doğru belgelenmiş profesyonel bilgilere sahiptir. BIM, O&M evresinde bazı karmaşık sorunların üstesinden gelmeye yardımcı olmaktadır. Bina/altyapı ile ilgili bilgiler BIM özellikli bir ortamda mevcut dijital teknolojilere doğrudan veya dolaylı olarak entegre edilebilmektedir (Lu et al., 2020).

Shahinmoghadam ve arkadaşları (2021) termal konfor ile ilgili çalışma yapmışlardır. Yakın zamanda mühendislik geliştirme alanındaki araştırma topluluğu dijital ikiz teknolojilere olan ilgisinin giderek arttığını göstermiştir. En son araştırma trendleri BIM ve IoT düğümlerinden canlı sensör verisi akışı yoluyla sağlanan zengin bina bağlamsal verilerini (3D geometri, uzamsal ilişkiler vb.) entegre ederek binaların doğru ve canlı dijital ikizlerinin nasıl oluşturulacağı üzerinde durmaktadır. Ayrıca, etkileşimli 3D görüntü oluşturma motorlarında (ör. WebGL) geliştirilen arabirimler kullanılarak dijital ikizleri daha sezgisel ve etkileşimli hale getirme konusunda umut verici sonuçlar da bildirilmiştir. Ayrıca, makine öğrenimi algoritmalarının bina tarihi verileri üzerinden uygulanması dijital öğretilere kendi kendine öğrenme özellikleri eklenmesini mümkün kılmaktadır. Bu, deneysel yöntemlere ve simülasyon tabanlı modellere dayalı olarak bir binanın belirli durumu veya davranışı hakkında gerçek zamanlı tahminlerin pratik bir bakış açısından önemli ölçüde zorlayıcı veya verimsiz olduğu göz önünde bulundurulduğunda yüksek değer sunmaktadır. Örneğin, termal konfor tercihlerinin gerçek zamanlı tahminlerini yapmak için çeşitli değişkenlerin

verilerini (örn., alan geometrisi, kapalı ortam koşulları, giysi yalıtımı, metabolik hız, vb.) izlenmeli ve ardından karmaşık denklemlerde veya hesaplama açısından simülasyonlarda kullanılmalıdır. Binalardaki termal konfor, kullanıcının termal ortamdaki duyduğu memnuniyeti yansıtan bir koşul olarak görülebilmektedir. Binadaki kullanıcıların termal konforunu çeşitli faktörler etkilemektedir. Bu faktörler ölçülebilir ortam koşullarının (örneğin, hava sıcaklığı ve bağıl nem) yanı sıra metabolik hız, giysi yalıtım düzeyi ve alan aydınlatması gibi kişisel ve psikolojik faktörleri içermektedir. Kullanıcıların termal tercihlerinin zamanında ve doğru bir şekilde tahmin edilmesi, bina alanlarında termal konforlarını garanti etmekle kalmaz aynı zamanda önemli finansal ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. İkinci durum, bina alanlarındaki termal ortamın mevcut durumuna göre tahmin edilen yolcuların tercihlerine göre soğutma/ısıtma stratejileri oluşturularak elde edilebilmektedir. Bu amaçla, yolcunun termal hisleri üzerinde etkisi olan değişkenlerle ilgili canlı veriler (örn. Bağıl nem, hava hızı, dış sıcaklık) toplanabilir ve birkaç dakika içinde kullanıcıların beklenen termal tercihini tahmin etmek için öngörücü bir modelde kullanılabilir. Bununla birlikte, termal konfor olayının son derece karmaşık yapısı ve ifade edilen termal hislerin öznel hükümlerden doğrudan etkilenmesi nedeniyle termal konforun etkili bir şekilde tahmin edilmesi yapı mühendisliği araştırmalarında ele alınması gereken bir sorun olmaya devam etmektedir (Shahinmoghadam et al., 2021).

Fjerbæk ve arkadaşları (2022) ısıtma sistemlerinin otomatik simülasyonları üzerinde çalışma yapmışlardır. HVAC (Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme) sistemlerinin ayrıntılı simülasyonları, binaların ve sistemlerinin bire bir dijital ikizleri oluşturulmasında önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle hidrolik sistemlerin ayrıntılı modelleri bina hizmetlerinin arıza tespiti ve kontrol optimizasyonu için çok önemlidir. Ancak HVAC sistemlerinin modellenmesi teknik resimlere veya modellere dayalı olarak oluşturulması gereken bileşenler ve bağlantılar nedeniyle yoğun bir işgücü gerektirmektedir. BIM verilerinden HVAC simülasyon modellerinin oluşturulması modelleme yükünü hafifletmekte ve dijital ikizlerin oluşturulmasını kolaylaştırmaktadır (Fjerbæk et al., 2022).

Zhao ve arkadaşları (2021) dijital ikiz kullanılarak enerji verimliliğini arttırmak için nZEB (Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar) üzerinde çalışma yapmışlardır. Neredeyse sıfır enerjili binalar klimasını en aza indirmek için pasif mimari tasarım (bina yönünü ayarlama, bina aydınlatmasını en üst düzeye çıkarma vb.) ile iklim özelliklerine ve

saha koşullarına uyum sağlamak, enerji ekipmanı ve sistemlerinin verimliliğini en üst düzeye çıkarmak ve yenilenebilir enerjinin (güneş enerjisi, jeo grafik enerji ve rüzgar enerjisi) bu binaların iç mekan çevre parametreleri ve enerji verimliliği göstergeleri neredeyse sıfır enerji binası için teknik standardın gerekliliklerini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Mimari tasarım sürecinde bina ısıtma, aydınlatma, klima ve havalandırmanın enerji tüketimi bina yönü, maksimizasyon bina aydınlatması ve gölgeleme önlemleri ayarlanarak azaltılabilmektedir. Temiz hava ısı geri kazanım sistemi bina klima sisteminin enerji talebini etkili bir şekilde azaltabilmektedir. Yenilenebilir enerji uygulamasının yerleşik ortamda uygulanması genellikle elektrik üretimi, ev içi sıcak su ve bina ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. Kentsel alan ve mevsimsel rüzgâr varyasyonu nedeniyle rüzgâr gücünün yerleşik ortamda uygulanması nispeten daha nadirdir. DT, sanal ve gerçek etkileşimli geri bildirim, veri birleştirme analizi ve karar verme yineleme optimizasyonu yoluyla dijital sanal modellerle gerçek ortamdaki fiziksel objelerin davranışlarını simüle edebilmektedir. Böylece fiziksel modeli ve bilgi modelini bağlayan bir köprü bağlaması olarak bir rol oynayabilmektedir. Projenin tüm yaşam döngüsünün zaman planını, maliyetini ve sürdürülebilirliğini değerlendirmek için BIM 6D dijital ikiz sistemi ve hesaplama sonuçları, malzemelerin karbon ayak izinin ana etkileme faktörü olduğunu göstermektedir. BIM teknolojisinin geliştirilmesiyle 3D yapı unsuru modelleme, binalara göre ortalanmış bir perspektif sağlamaktadır. Bu modelin taşıdığı bilgilerin eksiksizliği ve doğruluğu sorununu çözmektedir. Bu nedenle BIM modeline dayalı enerji tüketimi analizi, enerji tasarrufu sağlayan teknoloji geliştirme açısından büyük önem taşımaktadır. BIM'i tarama, BIM modelinin mevcut yapı verileriyle ilişkilendirilmesi için temel teknoloji olarak BIM ile mevcut yapı verilerini elde etme ve nokta bulutu teknolojisinin yardımıyla bir uygulamadır. BIM'i tarama uygulaması için teknik bir çerçeve önerilmiş ve binalar için ters modellemenin ana adımları anlatılmıştır. Nokta bulutu yerel alan bağlantı elemanı ve düzlemler, küboidler ve silindirler gibi temel yapılar oluşturmak için bir modelleme yöntemi önerilmiştir. Binaların temel konumlarını tarayan ve sınır modellerini otomatik olarak oluşturmak için nokta bulutu verilerini kullanan iç mekân düzlemleri için bir algoritma geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemler özel inşaat uygulamalarından bağımsız olarak idealize binalar için uygundur. Bu nedenle, araştırmacılar bu çalışmalarında mevcut binaların BIM enerji modellerini oluşturmak için nokta bulutu modellerini manuel olarak uydurma geleneksel modelleme yöntemi kullanılmaktadır (Zhao et al., 2021).

Schweigkofler ve arkadaşları (2022) dijital ikizin enerji yönetim aracı olarak BIM ve IoT veri entegrasyonu üzerine odaklanmışlardır. Binaların O&M döneminde denetçilerin önlem alabilmesini acil durumlarla başa çıkılabildiğini ve enerji verimliliğini artırmasını sağlamak için çevre bilgileri sürekli olarak izlenmektedir. Bununla birlikte bina yöneticileri ve karar vericiler verileri görselleştirmeye, yorumlamaya ve kullanmaya olanak tanıyan çözümlere ihtiyaç duymaya devam etmektedir. Halen metin veya elektronik tablolar kullanılmakta bu da gerçek zamanlı bina performansının anlaşılmasının ve takip edilebilmesinin yanı sıra çalışma hatalarına meyilli bir durum olmaktadır. Bu nedenle toplanan verilerin gerçek zamanlı olarak görselleştirilmesi ve analizi için daha hızlı, daha verimli ve daha az hatalı yöntem gerekmektedir. Belirli koşullar altında insanları uyarabilecek bir izleme sistemi olmalıdır. Yazarlar, BIM sensör entegrasyonunun iç mekân durum verilerini kullanıcı dostu bir dijital sistem içindeki işletme yöneticileri sahipleri ve kullanıcılar için somut ve erişilebilir hale getirilerek bina yönetimi ve çalışmasına nasıl daha duyarlı bir şekilde yol açabileceğini göstermişlerdir (Schweigkofler et al., 2022).

Liu ve arkadaşları (2020) dijital ikiz tabanlı bir iç mekân güvenlik yönetim sistemi üzerinde çalışma yapmışlardır. İç mekân güvenlik yönetimi yöntemleri güvenlik verilerini kapsamlı bir şekilde analiz edemez ve bu da güvenlik yönetimi ve bina bilgilerinin zayıf bir kombinasyonundan oluşmaktadır. Ayrıca, tehlikenin kararı güvenlik yönetimi personelinin deneyimine büyük ölçüde bağlıdır. Araştırmacılar bu çalışmada, bina iç mekân güvenlik yönetimi için dijital ikizleri tanıtmışlardır. DT tabanlı bir iç mekân güvenlik yönetim sistemi için BIM, IoT, internet ve destek vektör makineleri kullanılarak iç mekân güvenlik yönetimi için daha iyi bir istihbarat seviyesi elde edilmesi amacıyla bir çerçeve önermişlerdir. Dijital ikiz modeli, IoT sensörleri tarafından toplanan çalışma bilgileriyle entegre BIM kullanılarak geliştirilmiştir (Liu, et al., 2020).

Tan ve arkadaşları (2022) iç mekân aydınlatmasının enerji verimliliğini arttırmaya yönelik dijital ikiz kullanımına odaklanmışlardır. Akıllı aydınlatma sistemleri ve gözetleme sistemleri, akıllı binaların önemli bir parçası haline gelmiştir. Bununla birlikte, mevcut akıllı aydınlatma sistemi genellikle bağımsız sensör kontrolünü benimsemekte ve diğer dijital sistemlerle çok kaynaklı heterojen veri füzyonu gerçekleştirememektedir. Aydınlatma ölçeğinin ve aydınlatma kalitesinin sağlanması durumlarında aydınlatma sistemlerinin enerji dönüşüm verimliliğinin

iyileştirilmesi yeşil bina enerji tasarrufunun önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Şu anda, aydınlatma sistemleri için yaygın olarak kullanılan enerji tasarrufu yöntemleri manuel anahtar kontrolü ve flüoresan lambalar yerine sensör kontrolü ve LED ışıkların kullanımını içermektedir. Bu yöntemler, aydınlatma sistemlerinin enerji tüketimini etkili bir şekilde azaltabilmesine rağmen ilk kurulum maliyetinde de önemli bir artışa neden olmaktadır. Bu aydınlatma sistemlerinin en büyük dezavantajı enerji tüketimi tahmininin yanı sıra tüm yaşam döngüsü işletme ve bakım için büyük zorluklar sunan akıllı ve entegre yönetimin gerçekleştirilememesidir (Tan et al., 2022).

Yan ve arkadaşları (2022) akıllı pompalı güç istasyonu araştırmasına odaklanmışlardır. Son yıllarda enerji devriminin ve dijital devrimin entegre gelişimiyle karbon pik ve karbon tarafsızlığı stratejisi uygulanmıştır ve bu da enerji ve elektrik gücü endüstrisinin büyük değişiklikler geçirdiği durumu ortaya koymuştur. Enerji güvenliğinin sağlanması iklim değişikliğiyle başa çıkma daha da önemlisi doğal çevrenin korunması ve sürdürülebilir kalkınmada başarı hedeflerinde önemli bir uzlaşma haline gelmiştir. Ulusal enerji teknolojisi alanındaki genel güç ve yönetim düzeyindeki artışla ekipman güvenliği, ekipman güvenilirliği, bilgi farkındalığı ve uygulama istihdamı açısından yetersiz kapasite sorunları özellikle daha da kötüleşmektedir. Ayrıca ağ güvenliği daha da kötüleştikçe karar verme ve genel güvenlik korumasının profesyonel olarak uygulanamadığı ve kaynak ağ koordinasyonu giderek daha belirgin hale gelmektedir. Buna ek olarak, değişken yenilenebilir enerjinin güç üretimine sürekli entegrasyonu, rastlantısallık, kesintili ve diğer özellikler güç ağının güvenliğine büyük bir meydan okumakta ve pompalanan depolama güç istasyonunun güvenilirlik ve kaynak ağı koordinasyon kapasitesi için yüksek gereksinimler ortaya koymaktadır (Yan et al., 2022).

Li ve arkadaşları (2019)'da akıllı sözleşmeler üzerinde çalışma yapmışlardır. Akıllı sözleşmeler, inşaat projesi gereksinimlerini bilişsel bir şekilde ifade etme ve sözleşme maddelerinin otomasyonunda artan yetenekler nedeniyle BIM'nin temel tamamlayıcı kavramlarından biri olmaktadır. BIM tarafından sağlanan sayısız model kullanımı ve kullanım durumları aracılığıyla tüm bina yaşam döngüsünü dijitalleştirme potansiyeli, BIM, IoT ve DLT (Dağıtılmış Defter Teknolojisi) arasında daha fazla entegrasyon fırsatı yaratmaktadır. Daha fazla iş birliği ve bilgi paylaşımını teşvik eden daha iyi denetim ve izlenebilirlik sağlayan işletmelerin ve kuruluşların çalışma şeklini değiştirme potansiyeline sahiptir. İnşaat sektöründe IoT uygulamaları tedarik zinciri

yönetimi, inşaat yönetimi, akıllı binalar ve şehirlerde araştırılmıştır. Akıllı sözleşmeler, belirli davranışlara uygun makine tarafından okunabilen kod parçalarıdır ve önceden belirlenmiş yükümlülüklerin yerine getirilmesi üzerine kendi kendini uygulamak için tasarlanmıştır. Kuruluşların işlem yapma şeklini değiştirme ve insan etkileşimine gerek kalmadan müzakere etme yeteneğine sahip olma potansiyeline sahiptir. Ancak geleneksel inşaat sözleşmelerinde gerekli görülen karmaşıklık, esneklik ve deneyim kararlarının uygulanması nedeniyle akıllı sözleşmelerin geleneksel inşaat sözleşmelerinin tamamını değiştirme yeteneği olduğu düşünülmektedir ve bu sözleşmeler geleneksel sözleşmelere göre daha pahalı ve verimsiz olabilmektedir. Bu nedenle, Mason (2017) kısa vadeli veya anlık sözleşmelerin şu anda akıllı sözleşmeler için daha uygun olduğunu ve şu anda tam otomasyonun mümkün olmadığını ve şimdilik yarı otomasyona odaklanması gerektiğini öne sürmüştür. Akıllı sözleşmelerin güçlü yanlarından biri tarafların imzaladığı anlaşmaları gösteren güçlü bir kanıtlama yolu olarak hareket edebilmeleridir. Sözleşme şartlarının ödemesiz ve geç ödenmesi inşaat sektörünün en büyük zorluklarından biridir. Fiyat para biriminin otomatik ödemeleri; taşeronları ve tedarik zincirini son ödemelerden kaynaklanan sorunlara karşı korumanın yanı sıra yetersiz ödeme riskini azaltmak, verimliliği artırmak ve ödeme süresini azaltmak için akıllı sözleşmelere dönüştürülebilmektedir. Ancak faydaların gerçek anlamda gerçekleşebilmesi için sektörün ödeme reformu yapması gerekmektedir. Akıllı sözleşmelerin uygulanmasının önündeki temel engeller arasında belgelerin bakımı, depolama, birlikte çalışabilirlik, verilerin güvenilirliği, gizlilik ve gerekli potansiyel uzun ömür göz önünde bulundurulduğunda akıllı sözleşmelerin kodlanmasındaki karmaşıklık yer almaktadır (Li et al., 2019).

La Russa ve Santagati (2020) müze koleksiyonlarının yönetimi için dijital ikiz kullanımı üzerine çalışma yapmışlardır. AEC alanı ve tarihi mimari etki alanına özel olarak atıfta bulunan gelişmiş ve yenilikçi dijital iş akışlarının benimsenmesi ve koruma etkinliklerinden yararlanıp en iyi duruma getirebilmektedir. Miras koruması altında kalan tüm binalar arasındaki müze araştırmasının temel olarak ele alınacağı belirli bir tipoloji vardır örneğin tarihi mimarilerde barındırılan müzeler gibi. Bu durumda miras koruma sorunu hem binanın geçmiş değerlerini hem de koleksiyonların özelliklerini göz önünde bulundurmaktır. Örneğin, müze koleksiyonları için optimum çevre koşullarının ve tarihi binanın uygun şekilde korunması kritik önem

taşımaktadır. Londra'daki doğal tarih müzesi kısa bir süre önce bu teknolojiyi benimsemiş olsa da tarihi miraslar ve müzeler alanında sınırlı bir uygulama alanı bulmuştur. Birçok kurum H-BIM (Tarihi Bina Bilgileri Modelleme) uygulamaktadır ve buna paralel olarak Grasshopper, Dynamo, Node Red, Ardublock, NETLab Toolkit, Toolkit gibi kullanıcı dostu VPL (Görsel Programlama Dili) geliştirmesi sayesinde mimaride hesaplama tekniklerinde artış olmuştur. Bu hesaplama araçlarının esnekliği H-BIM modellerini yeni kavramlar, tanımlar, eylem ve bilgi katmanlarıyla zenginleştirmenin yanı sıra verileri ve farklı modelleri yönetmemize, kataloglamamıza ve yeniden sıralamamıza olanak tanımaktadır. Bu teknolojiler genellikle müze düzenlerinin ve bunları içeren mimarilerin ihtiyaçları için tüm önemli parametrelerin sürekli ve gerçek zamanlı olarak izlenmesine olanak tanıyan WSN ile birlikte kullanılmaktadır. Floransa'daki Palazzo Vecchio'da Sala dei Cinquecento'nun projesi, Roma'daki Palazzo della Civiltà Italiana'da ve Turin'deki Museo Egizio'da dikkat çekici örnekler olarak değerlendirilebilmektedir (La Russa and Santagati, 2020).

Zhao ve arkadaşları (2022) dijital müzelerin tasarımında dijital ikiz uygulamalarına odaklanmışlardır. Giderek dijitalleşen bir dünyada yapay zekâ teknolojileri ve takılabilir cihazları dijital müzelerde birleştirmek katılımın artırılmasında yardımcı olabilmektedir. Sanat galerilerinde ve müzelerde turist deneyimlerini etkilemek için yapay zekânın stratejik işlevini ve uygulamasını araştırmanın yanı sıra eğitimi iyileştirme potansiyelini araştırmak gerekmektedir. Ayrıca dijital ikiz zorlukları hafifletmenin veya dijital deneyimlerle dijital müzelere erişimi iyileştirmenin önünü de açmaktadır. Benzersiz olması ve önemli çevresel tehlikelere karşı açık olması nedeniyle dijital müzelerde sanat ve kültür mirasının korunması ciddi bir konudur. Sanatsal mirasın durumunu değerlendirmek ve aşırı hareketlerden korumak için birçok yaklaşım vardır. Geleneksel müzeler atmosferde kolayca trafik ve gürültü oluşturabilecek gerçek konumlara bağlıdır ve bazı kişiler çeşitli amaçlar için fiziksel müzelere erişememekte bu nedenle dijital müzeler durum gereği gelişmektedir. Gerçek varlık müzelerinin üç boyutlu yöntemi, Stereoskopik Vizyon sistemi, etkileşimli medya teknolojileri, görsel efekt teknikleri ve diğer yenilikler kullanılarak ağ üzerindeki müzeler gösterilmektedir (Zhao et al., 2022).

Torrecilla-Garcia ve arkadaşları (2021) dijital ikizlerin İSG (İş Sağlığı ve Güvenliği) üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bina inşaatında iş sağlığı ve güvenliği göz önünde bulundurulduğu zaman iş riskleri ve iş yeri yaralanmaları dünya çapında

hala sorun teşkil etmektedir. İnşaat sektöründe giderek artan dijitalleşme ve yalın inşaat gibi acil yönetim yöntemleri İSG iyileştirmesine odaklanan yeni stratejileri ve yöntemleri geliştirmiştir. Ancak Endüstri 4.0 teknolojilerinin inşaat bütünsel yönetim sisteminde uygulanması hala zordur. BIM, VR (Sanal Gerçeklik) ve MR (Karma Gerçeklik) oluşturma iş sağlığı ve güvenliğinin işlevsel alanına halihazırda yerleştirilmiş olan gelecekteki stratejilerin temas noktalarının örneklerindedir. BIM teknikleri inşaat güvenliği planlamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna göre görselleştirme teknolojilerinin gelişimi sayesinde BIM aynı zamanda risk tanıma ve önleme gibi inşaat güvenliği sorunlarını ve çalışanların güvenlik eğitimlerini çözmeye yönelik bir uygulama bulunmuştur. 4D BIM modelleri paydaşlara daha doğru ve sezgisel risk algılama kapsamı geliştirmek için yapı ayrıntıları ve sonuç olarak da sağlayabilmektedir. Güvenlik Yöneticileri, makine öğrenimi uygulaması aracılığıyla güvenlik düzenlemeleri ve yapı verilerine göre BIM içinde işlenen bilgileri birbirine bağlayan ve görselleştirme, sanal haritalama ve simülasyona dönüştüren bir çerçeve oluşturabilmektedir. BIM bilgilerinin risk yönetimi kurallarıyla birlikte bu şekilde eşleştirilmesiyle proje ve inşaat aşamaları sırasında tehlikelerin “sıcak noktaları” neredeyse otomatik olarak tespit edilebilmektedir (Torrecilla-Garcia et al., 2021).

Lima ve arkadaşları (2021) prekast beton üzerine çalışma yapmışlardır. Prekast beton sistemi son yıllarda giderek daha da büyümektedir. Bu büyüme ile inşaat sürecindeki gelişme maliyet azaltma ve daha iyi kalite gibi avantajlara neden olmaktadır. Ancak yönetim süreçleri sırasındaki belirsizlikler ve bağımlılıklar bu yapıcı sistemde mevcut sorunlardır. Prefabrik sistem hala gelişmiş bir belirsizlik sunmaktadır. Süreçlerin öngörülememesi, fabrika ve şantiye arasında büyük bir yer değiştirme, inşaattan önceki faaliyetler arasında koordinasyon eksikliği, proje düzeneğinde düşük güvenilirlik ve diğer faktörler tarafından sıklıkla tetiklenmektedir. Bu yapıcı sistemin paylaştığı bir diğer zorluk da karar verme aşamasında yer alan taraflar arasındaki düşük verimlilik ve iş birliğidir. Bu sorun istenen bilgi akışını iletmeyecek ve engellemeyecek farklı izole yönetim süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Mevcut yönetim bağlamını iyileştiren alternatifler arayışında inşaat sektörü idari inşaat projelerinin daha verimli bir şekilde yönetilmesini mümkün kılan bir dizi yenilikçi çözüme tanık olmuştur. Bu anlamda çözümlerin dijital bir dönüşümle elde edildiği ve bu amaçla kullanılan merkezi teknolojinin BIM olduğu sonucuna varılmaktadır. Ayrıca projedeki görsel kaynaklardan elde edilen kazançlar, bilgi alışverişinde artış,

daha yüksek üretkenlik ve daha yüksek ürün kalitesi nedeniyle BIM'nin prefabrike binalarda giderek daha fazla uygulandığı açıklanmıştır. Bu teknolojilerin entegrasyonu prekast elementler için yararları gösterse de entegrasyonlarının zorlu ve karmaşık olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca kalite denetimi ve montaj takibi iyileştirmesi için uygulamaların geliştirilmesi gerekli olarak tanımlanmaktadır. Bu ihtiyaçları karşılamak amacıyla BIM, IoT ve RFID'yi entegre ederek prekast beton unsurların lojistik yönetimini destekleyen bulut tabanlı bir platform geliştirilmiştir. Bunun için kullanılan yöntem DSR'dir (Tasarım Bilimi Araştırması). DSR artifaktların inşasını, araştırılmasını, doğrulanmasını ve değerlendirilmesini içermekte ve yeni pratik sorunları çözmek için arama yapmaktadır (Lima et al., 2021).

Zhou ve arkadaşları (2021) dijital ikizlerin prefabrik bina inşaatında kullanımıyla ilgili çalışma yapmışlardır. DTS teknolojisine yönelik prefabrik inşaat sistemi, üretim ve yapı bileşenlerinin montaj prosesindeki yapısal hasar ve deformasyon sorunlarını iyi çözebilmektedir. Özellikle prefabrik binalarda yapısal sorunlar ve malzeme sorunları nedeniyle tüm sistemde meydana gelebilecek bina bileşenlerinin hasarını gerçek zamanlı olarak izleyebilmekte ve tahmin edebilmektedir. DTS teknolojisi ve BIM prefabrik binaların inşası sırasında risk sorunlarının göstergelerini etkili bir şekilde izleyebilir ve olası güvenlik tehlikelerini daha da azaltabilmektedir. BIM ile bina inşaatı tasarımının akıllı sanayileşmenin geliştirilmesi ve yapı modelleme ile ilgili derinlemesine çalışmanın pratik uygulama değeri vardır. Prefabrik binalar, müşterilerin daha verimli, rahat ve kabul edilebilir insani binalarda yaşamalarına olanak vermektedir. Prefabrik binalarla geleneksel binalar arasındaki en büyük fark prefabrik binaların aslında sanayileşmiş üretimidir. Tüm bina yapılarını müşterinin önceden belirlediği şekilde özelleştirebilmekte ve yeni yapıyı makul montaj için iş sahasına götürebilmektedir. Prefabrik binaların avantajı çok fazla zaman kazanmaları ve görevlerini yüksek kaliteyle tamamlayabilmeleridir. Prefabrik binaların dezavantajı ise maliyetinin çok yüksek olması ve binanın yüksekliğinin sınırlı olmasıdır. DTS teknolojisi, gerçek fiziksel alandaki yapı objelerini, prefabrik binaların inşası üzerinde belirli bir etkiye sahip sanal alanla eşleyebilmektedir. Prefabrik binalara uygulanan DTS teknolojisi tüm sistemin tek bir yapı bileşeninden büyük ölçekli bir binaya kadar akıllı en iyi performansı göstermesini sağlamaktadır. DTS teknolojisinin prefabrik yapı sistemi, yapı bileşenlerinin üretim, taşıma ve montaj süreçlerindeki yapısal hasar ve deformasyon sorunlarını çözebilmektedir. Prefabrik binalardaki DTS teknolojisinin

yapısal sorunlar ve malzeme sorunları nedeniyle oluşabilen tüm sistemin yapı bileşenlerindeki hasarı izleyip doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir. Bu sürecin gerçekleştirilmesi tüm inşaat sürecinde önceden üretilmiş binanın güvenliğini ve güvenilirliğini etkili bir şekilde iyileştirebilmektedir (Zhou et al., 2021).

Zhao ve arkadaşları (2022) dijital ikiz yardımıyla prefabrikte komponent kaldırma yönetimine odaklanmıştır. Prefabrik bileşenlerin kaldırma işlemi prefabrik binaların inşası sırasında önemli bir adımdır. Bilgisayar kontrolünde kaldırma mevcut sorunları hedef alan araştırmacılar yaptıkları çalışmada dijital ikiz tabanlı yenilikçi bir kaldırma yönetim sistemi çerçevesi oluşturmuşlardır. Sistem çerçevesi, bilgisayar kaldırma kontrolü için dijital ikiz model oluşturmak amacıyla BIM ve IoT kapsamlı bir şekilde kullanılır ve modeldeki BIM verilerine göre kaldırma rotası planlaması gerçekleştirmek için Dijkstra'nın algoritmasını kullanmışlardır. LoRa (Uzun Menzili Radyo Teknolojisi), kaldırma sürecindeki bilgisayarların hareket durumunu izlemek için veri alımı ve iletimi için kullanmışlardır. DT kontrol yöntemi, prefabrikte bir inşaat projesinde test ederek gerçek zamanlı bilgi toplama, kaldırma yolu planlama ve PC konumlandırmasının işlevlerini yerine getirerek yöntemin uygulanabilirliğini ve etkinliğini kanıtlamışlardır (Zhao et al., 2022).

Zheng ve arkadaşları (2022) yaptıkları çalışmada dijital çift tabanlı bina çökmesine yönelik kaza incelemesi yapmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları bu çalışmada çökme kazasının olası nedenlerini ve mekanizmalarını yok ederek gelecekteki yapısal çökmeyi düzelterek esnekliği artırmayı hedeflemektedir. Ancak geleneksel yöntemleri kullanarak karmaşık çökme kazalarını araştırmanın bazı engelleri vardır. Örneğin yerinde araştırma ve simülasyon analizi arasındaki senkronize olamama fark edilebilir bir durum olup çökme kazalarının nedenini bulmayı zorlaştırabilmektedir. Bu nedenle araştırmacılar kazalar için çift tabanlı dijital bir araştırma yöntemini önermişlerdir. İlk olarak, sanal dijital bina modelleri gerçek dünyadan bilgiler kullanılarak oluşturmuşlardır. Ardından gerçek dünyadan gelen verileri sanal alana eşleştirdikten sonra binanın çökmesi olayından önce ve sonra ilgili son derece gerçekçi çok aşamalı modeller oluşturulup senkronize etmişlerdir. Araştırmacılar, dijital ikiz yöntemini kullanarak modeller verimli bir şekilde entegre edilebilir, güncellenebilir ve kontrol edilebilir olduğunu kanıtlamışlardır. Son olarak potansiyel çökme mekanizması ilgili modellerin yardımıyla ortaya çıkmıştır. Çökme kazaları, geleneksel yöntemlerle çöküşün nedenini tespit etmek zordur. Bu nedenle

kaza incelemenin iyileştirilmesi için ikili tabanlı dijital bir kaza inceleme çerçevesini önermişlerdir (Zheng et al., 2022).

Oyarhossein (2021) yaptığı çalışmada hastane tesislerinin sağlık izlemesi için dijital ikizlerle desteklenmesine odaklanmıştır. Yapının sağlığı, davranışsal özellikleri tanımlanabilir ve yararlı yaşamları boyunca yapılarda meydana gelen olası bir arıza tespit edilebilmektedir. Yapısal sağlık, hasar tespiti ve yapılardaki konum gibi çeşitli sorunların ele alınma sürecidir. Yapısal sağlık sisteminde, yapının davranışını bildirmek için bir sensör ağı kullanılmaktadır. Sensörlerin kurulmasıyla ilgili bilgiler verilerin kaydedilmesi ve işlenmesiyle ilgilidir. Sonuç olarak, izleme için önemli bir süreç almakta, veri eksikliği yanlış veya yetersiz etkilere neden olmakta ve analizde ek karışıklık durumları olmaktadır. Veriler analiz edilmekte ve işlenmektedir. Ayrıca, sensör sayısının artırılması monitör maliyetini de artırmaktadır. Sensör ağının optimum tasarımının kullanılması, tip sensörlerinin, tip, numara ve konumların doğru kullanımının kritik önem taşıdığı anlamına gelmektedir. Bu amaçla, araştırmacı bu araştırmasında soğuk haddelenmiş çelik saclardan yapılmış hafif yapılarda sensör ağını sağlık sistemi için optimum şekilde tasarlamak amacıyla bir yöntem kullanmıştır. Sensörlerin optimum konumu modal parametreleri algılama yeteneğinden kaynaklanmaktadır (Oyarhossein, 2021).

Han ve arkadaşları (2022) gelişmiş yol sıkıştırma kalitesi izleme ve yönetimi hakkında çalışma yapmışlardır. Yol yapım endüstrisi, verimliliği artırmak ve maliyet tüketimini azaltmak için daha yüksek inşaat kalite kontrolü ve yönetim gereklilikleri nedeniyle sürekli bir dijital dönüşümden geçmektedir. IC (Akıllı sıkıştırma), algılama gecikmesi ve eksiklik gibi mevcut kalite kontrol ve kalite güvence yaklaşımlarının sınırlamalarının üstesinden gelebilen, yeni ortaya çıkan ve gelişen bir teknolojidir. Bununla birlikte, IC esas olarak gerçek zamanlı kalite denetimini gerçekleştirmek için bir araç sisteminde kullanılırken kapsamlı, sürekli ve tahribatsız bir test aracı olarak gelişmiş inşaat kontrolü ve yönetiminde daha fazla potansiyeli tam olarak uygulanmamaktadır. Araştırmacılar bu çalışmada gelişmiş sıkıştırma kalitesi izleme ve yönetimi için temel bir platform sağlamak üzere bir BIM, IoT ve IC entegre çerçevesi önermişlerdir. Özellikle BIM, veri entegrasyonu, görselleştirme ve inşaat organizasyonu yönetimi için yol altyapısının yüksek doğrulukta sanal varlıklarını sağlamaktadır. IC, kapsamlı sıkıştırma kalitesi izleme verileri ve kalite kontrol yöntemleri sağlamak için kullanılmaktadır. IoT, inşaattaki gerçek operasyonlardan

gerçek zamanlı veriler toplayarak fiziksel ve siber varlıkları birbirine bağlamak için benimsenmiştir. Son olarak, çerçevenin bir uygulaması olarak bir prototip sistem geliştirilmiştir. Sistemin vaka gösterimi önerilen çerçevenin IoT verileriyle birlikte yol sıkıştırma kalitesi ve verilerinin izlenmesini gerçekleştirmek için BIM ve IC'yi etkili bir şekilde entegre edebildiğini ve inşaat programının izleme sonuçlarına göre yeniden düzenlenebileceğini ve optimize edilebileceğini göstermiştir (Han et al., 2022).

Alvarez ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada havaalanı kaplama yönetimine odaklanmışlardır. Artan uçak yolcusu sayısı nedeniyle havalimanları ve daha küçük bölgesel havaalanları pist kullanımında artış yaşanmış ve bu nedenle bakım ihtiyacını hızlandırmıştır. Havalimanlarında bakım, güvenliği sağlamak, kaliteli inşaat sağlamak ve aşırı hava trafiği gecikmelerini önlemek için sürekli olarak yenilenen bir dizi faaliyeti içermekte ve bunların tümü de karmaşık bir sistem gerektirmektedir. Bu karmaşık sistemin özelliklerinden biri de dahil olan çok sayıda arabirim ve aracıdır. Her bir pist inşaat projesi için bir iş birlikleri ağı kurulmakta ve ardından projenin sonunda tasfiye edilmektedir. Böyle bir ağdaki uzmanlaşmış düğümlerin sayısı (dahil olan şirketlerin sayısı) fazladır ve bilgi alışverişi her zamankinden daha siktir. Bilgi alışverişinde başarısızlıklar veya kesintiler yaşamak, kaynaklarda veya görevlerde senkronizasyon eksikliğinden kaynaklanan gecikmeler gibi ilgili risklere maruz kalmaktadır. Havaalanı kaplamasının temel işlevleri, yeterli taşıma kapasitesi, iyi yuvarlanma nitelikleri ve tatmin edici yüzey sürtünme özellikleri sağlamaktadır. Bakım kolaylığı, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik, zaman içinde daha alakalı hale gelen diğer gereksinimlerdir. Yeniden yüzeye çıkma veya rehabilite etme kararı hafife alınmaması gerektiğinden karar verme süreci için çok sayıda kaynaktan yeterli veri çok önceden elde edilmelidir. Bu veriler, diğerlerinin yanı sıra trafik tahmini, hava tahmini, bütçe ve paydaşlarla istişare gibi diğerlerinin yanı sıra kaplama koşullarına özgü verileri içerebilmektedir. Hizmet dışı dönemlerin etkisi nedeniyle, inşaat projeleri ve özellikle havaalanı kaplama bakımı için operasyonların etkin ve verimli yönetimi kritik öneme sahiptir. Örneğin, tamamen çalışır durumdaki bir pistte uygulama aşaması inşaat aşamasından daha uzun bir süre gerektirirken son aşamada kararlar neredeyse “sürekli gerçek zamanlı” olarak alınmaktadır. Bu nedenle, yaşam döngüsü boyunca doğru bilgilendirilmiş kararların alınmasını sağladığından değer zinciri boyunca paydaşların iş birliğini teşvik etmek önemlidir. Bu amaçla, dijital bilgileri yönetmek için oluşturulan araçlar tüm bu dijital bilgi akışlarının entegrasyonu

için fırsat sağlamaktadır. Bu nedenle, BIM gibi dijital destekli bir yönetim yaklaşımı inşaatta üstyapı yönetimini geliştirebilecek ve dijitalleşme için fırsatlar sağlayabilecektir (Alvarez et al., 2021).

Chen ve arkadaşları (2021) binalardaki acil durum yangın güvenliği üzerine çalışma yapmışlardır. Yüksek katlı bina yangınları bina sakinleri ve itfaiyeciler için önemli bir tehdit oluşturabilmektedir. Sensör tabanlı IoT, BIM, VR ve AR gibi en son teknolojiler bina yangın güvenliğini ve öncelikle durumsal farkındalık düzeyini iyileştirerek kurtarma etkinliği için büyük potansiyel sunabilmektedir. Chen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada durumsal farkındalığın mantığına dayanan bir kavram kanıtı olarak BIM, IoT ve AR/VR sisteminin prototipini oluşturmak için yenilikçi bir teknoloji entegre çerçevesi önermişlerdir. Çerçevenin işlevselliğini değerlendirmek için simüle edilmiş bir yangın senaryosuna dayalı bir pilot test gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, sistem tarafından üretilen verilerin itfaiye departmanı tarafından iç mekân yangınlarının yerini hızlı bir şekilde bulmak için kullanılabilirliğini ve VR senaryolarının durumsal farkındalığın gelişimini hızlandırabileceğini ortaya koymaktadır. BIM, yangınla ilgili daha fazla bilgiyi algılamak ve sunmak için diğer teknolojilerle de entegre edilebilmektedir. Çoğu çalışma, BIM'in yangın bilgisi sorgulamalarını ve tahliye yolu planlamasını destekleme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde çeşitli sensör türleri tarafından desteklenen IoT çerçeveleri bir binanın durumunu gerçek zamanlı olarak yansıtabilmekte ve bu tür bilgiler yangın durumunun dinamik analizi ve görselleştirilmesi için BIM'e entegre edilebilmektedir. Bu sayede binaların dış ve iç ortamları daha iyi bir şekilde anlaşılabilir. Acil duruma müdahale için kinetikle ilgili yeteneği geliştirmek için itfaiyeciler hortum sürüklemeye, merdiven çıkma vb. gibi simüle edilmiş eğitime başvurulabilmektedir. Özellikle çevresel görünürlük büyük ölçüde tehlikeye girdiğinde itfaiyeciler için arama, kurtarma ve yangınla mücadeleyi güvenli ve verimli bir şekilde uygulamak için mekânsal yönelimi korumak temel bir beceridir. Bununla birlikte kapalı bir alanda itfaiyeciler tarafından algılanan çevresel bağlam büyük ölçüde değişebilmektedir. Kurtarıcıların durumsal farkındalığını geliştirmek için gerçeklik eğitimi önemlidir. Günümüzde VR büyük ve karmaşık eğitim ortamlarının oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Dolayısıyla yüksek riskli eğitim güvenli ve uygun maliyetli bir şekilde yürütülebilmektedir (Chen et al., 2021).

Ospina-Bohórquez ve arkadaşları (2023) rüzgâr çiftliği inşaatını izlemek için dijital ikiz kullanımını önermişlerdir. Bir inşaat projesinin ilerlemesini izlemek, proje ihtiyaçlarına göre bilinçli ve zamanında kararlar alınmasına izin veren bilgilerin elde edilmesine izin verdiği için hayati önem taşımaktadır. Yetersiz izleme, projenin kontrolünün kaybedilmesine yol açarak maliyetlerin ve zamanın artmasına neden olabilmektedir. En çok kullanılan ve köklü izleme yöntemleri zaman alan ve insan hatasına açık olabilen manuel veri girişi gerektirmektedir. Araştırmacılar yaptıkları bu çalışmada bir rüzgâr çiftliğinin inşasını izlemek için bir CE oluşturmayı önermişlerdir. Tasarlanan modeller (tasarım aşamasından itibaren) ile inşa edilen modeller (farklı zamanlarda gerçek inşaatı temsil eden) arasında bir karşılaştırma yapmışlardır. Sonuç olarak CE inşaat sırasında meydana gelebilecek sapmaların kontrol edilmesine yardımcı olabilmektedir (Ospina-Bohórquez et al., 2023).

VI. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dijital ikiz teknolojisi, mühendislik ve inşaat alanını yıllardır hiç görülmeyen bir şekilde değiştirmektedir. Son birkaç yıl içinde art arda gelen teknolojik gelişmeler 4. Endüstri devriminin yükselişine yol açmıştır. Bu devrimsel hareketin en iyi vizyonu fiziksel ve dijital ortamlar arasındaki sınırları ortadan kaldırmaktır. Nesnelerin interneti bu devrimin şekillendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. IoT birbirine bağlı nesnelerin (örn. sensörler, aktüatörler, makineler vb.) ağları olarak görüntülenebilir ve bu nesneler arasında gerçek zamanlı iletişim ve bilgisayar uygulamalarıyla iletişim sağlamaktadır. Bu tür bir bağlantı otomasyonu ve "eşyaların" uzaktan kontrolünü önemli ölçüde artırabilmektedir. Sensörler ve aktüatörler güç, maliyet ve boyut açısından giderek daha fazla geliştiğinden IoT çözümlerini devreye almak için giderek daha fazla sektör teşvik edilmektedir. Hem BIM hem de IoT bina, inşaat ve altyapı sektöründe giderek daha fazla kullanılmaktadır. BIM gibi teknolojilerin devrimi ve benimsenmesi inşaat sektöründe önemli bir değişime neden olmaktadır. BIM'nin küresel olarak benimsenmesi tasarım ve mühendislik aşamasında benimsenen BIM'nin inşaat sektöründeki inşaat teknolojisinin ilerlemesine yönelik potansiyeli ve faydası nedeniyle hızlanmaktadır.

BIM, karbon ayak izini ölçmek için güçlü bir veri tabanı sağlayabilmektedir. BIM'nin hem yeni hem de mevcut binalarda uygulanması süreç ve bilgi akışlarında kökünden değişiklik yapılmasını önleyerek önemli avantajlar sağlamaktadır. Proje yönetimini ve risk azaltmayı geliştirebilir veya tesis yönetiminin maliyetlerini ve süresini sınırlayabilmektedir. Ayrıca sürdürülebilirlik derecelendirmelerini ve sertifikaları da etkileyebilmektedir. Enerji tüketimi, atık su ve bakım maliyetlerini izlemek mümkün olabilmektedir. Binanın çevresel etkilerini göstermek, tüketim ve emisyon değerlerini doğrulamak ve izlemek mümkün olabilecektir. Ayrıca veri yönetimi, bakım programları ve ekipman garantilerini bozulma ve neden-sonuç ilişkileri bakımından da doğrulayabilecektir. Bir bina kullanım ömrünün sonuna ulaştığında bir bileşen seviyesinde geri dönüştürülebilirliğini göz önünde

bulundurabilmektedir. İnşaat verilerinin yapılandırılması, sağlanması ve işlenmesi için uluslararası standardizasyon mevcut olsa da veri uyumunun olmaması inşaat sektörünün diğer sektörlere kıyasla düşük verimliliği ve etkinliği için bir faktör olabilmektedir. Bununla birlikte, onlarca yıldır bilinen bir gerçektir ki maalesef inşaat endüstrisi tasarım, inşaat ve işletme süreçlerini entegre etmek için bilgi teknolojilerini henüz etkin bir şekilde kullanmamıştır. BIM metodolojisini gerçek zamanlı izleme ile birleştirmenin çok disiplinli yaklaşımı düşük maliyetli IoT sensörleri kullanılarak geliştirilmesi ilgi çekici olmaktadır. BIM, bir bina veya altyapı varlığının dijital temsili olarak tüm varlıkların bir veri tabanı oluşturmak, bilgilerin birleşik ve dijital bir şekilde alışverişini kolaylaştırmak için genişletilebilmektedir. BIM ve varlık yönetimiyle ilgili araştırmalar hala gelişme aşamasında olmasına karşın hızla büyümektedir. Ayrıca, günlük O&M yönetiminde BIM karmaşık durumlar ve kapsamlı veri yönetimi için yeterli değildir. Bulut BIM teknolojisi, geleneksel veri paylaşımı ve depolama yöntemlerine uygun maliyetli bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Dış kaynaklı veri işleme önemli bir ön kaynak, bakım maliyetleri ve ölçeklenebilirlik sunabilmektedir. Ayrıca, bir bulut BIM birden çok paydaşı entegre eden merkezi olmayan bir ortam oluşturmaktadır. Ancak güvenlik tehditleri ve iş sırları gibi engellemeler bulut BIMS'in (Yapı Bilgi Modelleme Sistemleri) benimsenmesine karşıdır. Ayrıca, veri bütünlüğü ve gizliliği üzerinde geçirgenlik, şeffaflık ve çok taraflı katılımın etkisine ilişkin endişeler de mevcuttur. Ayrıca, buluta özel BIM standartları da eksiktir. Daha fazla bulut BIM hizmeti geliştirildikçe bu hizmetler arasında standartlaşma çok önemli hale gelmektedir. IFC gibi açık standartlar bulut BIM uygulamalarının gereksinimlerini karşılayacak şekilde genişletilmelidir. İnşaat dünyası göz önüne alındığında sensörlerin gelişimi son yıllarda aktif olarak geliştirilen bir başka önemli izleme teknolojisidir. Sensör teknolojisinin yardımıyla inşaat alanındaki çalışanların, aletlerin ve malzemelerin güvenliğini sağlamak mümkün olup sınırlı görüş olanaklarımızın neden olduğu insan kaynaklı riskleri ortadan kaldırarak mümkün olabilmektedir. Sensörlerin kullanımı inşaat alanlarını doğru bir şekilde yeniden üreten BIM 3D modelleri kullanılarak yönetilen bir navigasyon sistemiyle ilgili olabilmektedir. Bu yaklaşım şantiyedeki karmaşık ve tehlikeli operasyonlarla ilgili riskleri (örn. Kör noktalarla çalışma) önleyebilmektedir. Bu nedenle IoT teknolojisine dayanan inşaat alanında gerçek zamanlı erken güvenlik uyarı sistemlerinin yakın zamanda geliştirilmesi temel bir araştırma alanı olmaktadır.

Bir gerçek sistemin dijital modeli ve fiziksel sistemi kontrol etmek için en uygun önlemleri belirlemek üzere çeşitli algoritmalar ve teknikler sayesinde yapılmaktadır. Bunu yapmak için fiziksel varlıklar (örn. Denetleyiciler) aracılığıyla yapılı ve ardından BT'nin varlıkların bulunduğu fiziksel durumu analiz etmek için bir DT sürecini analiz etmek ve bağlı olan verileri analiz etmek üzere veri seviyelerini fiziksel bir süreç aracılığıyla verileri analiz etmek için bağlı olan bir süreç modeli kullanılmaktadır. Nokta bulutları ve görüntülerden geometrik bilgiler alırken DT bu varlığın kullanımından ve/veya bakım eksikliğinden kaynaklanan yapıcı arızaları ve anormallikleri tespit etmek için kullanılabilir. Algılama özellikleri ve tutarlı iş akışlarından yararlanan DT varlık koşullarını bir bütün olarak izlemek için kullanılabilir ve bu bilgi kitlesinden kararların verilere dayalı olarak alınabilmesi için tutarsızlıkları tespit edip mümkün olan bileşenlerini kullanmaktadır. Bilgi alışverişi ağları DT'nin hazır olma durumunu ve verimliliklerini etkilemektedir. BIM ile iş birliği açısından birlikte çalışabilirliğin hayati önem taşıdığını göstermektedir. Son araştırmaların sonucunda BIM kullanıcıları arasında birlikte çalışabilirliği kolaylaştırmak için paylaşılan veri alışverişi ağlarıdır. Aynı şekilde etkili modellerin tanımına ve iş birliği düzenlemelerine daha fazla dikkat gösterilmektedir. Yine de DT için birden fazla paydaş BIM iş birliğinin hazırlık durumu gerçek zamanlı bilgilerin senkronize edilmesini sağlayan çözülmemiş bir sorundur. Dijital ve fiziksel dünya arasındaki entegrasyon eksikliği, inşaat sektöründe daha düşük bir verimlilik ve iş birliği seviyesi sağlamaktadır. Yaşam döngüsü boyunca ilgili fiziksel bir nesnenin görsel ve dijital modelini oluşturan dijital ikiz teknolojisi bu sorunları ele almak için etkili bir çözüm olarak kabul edilmektedir. DT, gerekli materyalin tanımlanması için gerekli çeşitli sensörlerin yanı sıra IoT desteğiyle birlikte çalışmaktadır. Bu nedenle, gelecekteki en iyi teknoloji olacaktır. Dolayısıyla, bir diğer trend teknoloji de BIM'dir. Bu BIM teknolojisinin benzersiz özelliği binanın görsel bir sunumunu verilen yerin veya binanın fiziksel ve işlevsel özelliklerinin gelişmiş bir örneğidir. Gelişmiş özelliklere sahip bu iki teknoloji bina inşaatını daha kolay bir hale getirmektedir.

Son araştırmalar, dijital ikiz uygulamasının yerleşik ortam projelerinde varlık oluşturma, sunma ve yönetim dijitalleşmesinde önemli bir rol oynayabileceğini ileri sürmektedir. Örneğin, dijital ikizlerin gelişmiş enerji izleme, tahmin ve verimlilik geliştirme için gerçek dünya modeli (fiziksel model) ile sanal kopyası arasında gerçek

zamanlı senkronizasyonu kolaylaştırdığını ve böylece genel enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabileceği düşünülmektedir.

Gelecekte dijital ikizlerin izleme ve simülasyon yoluyla siber fiziksel sistemler için yeni olanaklar sağlaması öngörülmektedir. Ancak bu hızla gelişen alanda güvenlik dikkate alınmamaktadır. Şu anda inşaat sektörü her zamankinden daha akıllı binalar ve şehirler yaratmaya çalışmaktadır. Teknolojinin giderek yaygınlaşmasının yanı sıra siber sistemler ile fiziksel altyapı arasında daha çok IoT olarak bilinen daha yakın bir entegrasyon da mevcuttur.

Dijital ikiz ve BIM'in entegrasyonu tüm bina yaşam döngüsünün neredeyse tüm aşamalarına hizmet edebilmektedir. Aynı zamanda dijital ikiz inşaat sektöründeki farklı sorunları çözmek için birçok ileri teknoloji ile birleştirilebilmektedir. Örneğin, RFID ve IoT ile dijital ikiz planlama ve çizelgeleme için bir temel sağlayarak inşaat sahalarındaki malzeme, ekipman ve işçilerin konumunu ve durumunu doğru bir şekilde kavrayabilmektedir. Dijital ikiz model ayrıca yapay zekâ ve bilgisayar görüşü ile daha doğru ve zamanında olabilmektedir. Ayrıca, literatürden araştırmaların çoğunluğu inşaat aşamasında, işletme ve bakım aşamasında dijital ikizin uygulama yöntemine ve dijital ikiz modellerin modelleme yöntemine odaklanmaktadır. İnşaat aşamasına ilişkin araştırma temel olarak güvenlik, izleme, insan-robot etkileşimi, kalite değerlendirmesi ve iletişim olmak üzere beş yöne odaklanmaktadır. Her yönde araştırma inşaat projesinin verimliliği ve sonuçları üzerinde büyük bir etkiye sahip olacaktır.

Verimli proje yönetimi için inşaat süreçlerinin dijitalleştirilmesi gerekli hale geldiğinden, dijital ikiz teknolojisi bunu sağlamak için yüksek bir potansiyele sahiptir. Teknoloji ilerledikçe dijital ikiz üretiminin maliyeti azalmaktadır. Proje yönetimi ve inşaat faaliyetlerinin planlanması için yaygın olarak kullanılan bir araç olmaları beklenmektedir. İnşaat yönetimi için dijital ikiz doğru ve zamanında kararlar almak için üstün bir araç olabilmektedir.

VII. KAYNAKÇA

MAKALELER

- ALONSO, R., BORRAS, M., KOPPELAAR, R. H., LODÌGIANÌ, A., LOSCOS, E., & YÖNTEM, E. (2019). SPHERE: BIM digital twin platform. **Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings**, 20(1), 9.
- ALSHAMMARÌ, K., BEACH, T., & REZGUÌ, Y. (2021). Cybersecurity for Digital Twins in the Built Environment: Research Landscape, Industry Attitudes and Future Direction. **International Journal of Civil and Environmental Engineering**, 15(8), 382-387.
- ALSHAMMARÌ, K., BEACH, T., & REZGUÌ, Y. (2021). Cybersecurity for digital twins in the built environment: current research and future directions. **Journal of Information Technology in Construction**, 26, 159-173.
- ALVAREZ, A. P., ORDIERES-MERÉ, J., LOREIRO, Á. P., & DE MARCOS, L. (2021). Opportunities in airport pavement management: Integration of BIM, the IoT and DLT. **Journal of Air Transport Management**, 90, 101941.
- BARBAROSOGLU, B. V., & MİLNER, B. CSC-3831 Advancing Project Management with Multi-Dimensional Project Controls and Digital Twin.
- BATTY, M. (2018). Digital twins. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, 45(5), 817-820.
- BOLSHAKOV, N., BADENKO, V., YADYKÌN, V., CELANÌ, A., & FEDOTOV, A. (2020, JUNE). Digital twins of complex technical systems for management of built environment. **In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** (Vol. 869, No. 6, p. 062045). IOP Publishing.
- BOJE, C., GUERRIERO, A., KUBÌCKÌ, S., & REZGUÌ, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. **Automation in Construction**, 114, 103179.

- CAI, J., CHEN, J., HU, Y., LI, S., & HE, Q. (2023). Digital twin for healthy indoor environment: A vision for the post-pandemic era. **Frontiers of Engineering Management**, 1-19.
- CARAMIA, G., CORALLO, A., & MANGIALARDI, G. (2021, OCTOBER). The Digital Twin in the AEC/FM Industry: a literature review. **In Proc. of the Conference CIB W78** (Vol. 2021, pp. 11-15).
- CELİK, Y., PETRİ, I., & REZGUİ, Y. (2021, JUNE). Leveraging BIM and blockchain for digital twins. **In 2021 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)** (pp. 1-10). IEEE.
- CHEN, H., HOU, L., ZHANG, G. K., & MOON, S. (2021). Development of BIM, IoT and AR/VR technologies for fire safety and upskilling. **Automation in Construction**, 125, 103631.
- CHEN, C., ZHAO, Z., XIAO, J., & TIONG, R. (2021). A Conceptual Framework for Estimating Building Embodied Carbon Based on Digital Twin Technology and Life Cycle Assessment. **Sustainability** 2021, 13, 13875.
- DAWKINS, O., DENNETT, A., & HUDSON-SMITH, A. P. (2018). Living with a digital twin: Operational management and engagement using IoT and Mixed Realities at UCL's Here East Campus on the Queen Elizabeth Olympic Park. In *Giscience and Remote Sensing*. GIS Research UK (GISRUK).
- DAI, R., & BRELL-ÇOKCAN, S. (2022). Digital twins as education support in construction: a first development framework based on the Reference Construction Site Aachen West. **Construction Robotics**, 6(1), 75-83.
- DANIOTTI, B., MASERA, G., BOLOGNESI, C. M., LUPICA SPAGNOLO, S., PAVAN, A., IANNACCONE, G., ... & CUCUZZA, M. (2022). The Development of a BIM-Based Interoperable Toolkit for Efficient Renovation in Buildings: From BIM to Digital Twin. **Buildings**, 12(2), 231.
- DEPRÊTRE, A., JACQUINOD, F., & MIELNÍCZEK, A. (2022). Exploring digital twin adaptation to the urban environment: comparison with CIM to avoid silo-based approaches. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 4, 337-344.

- DENG, T., ZHANG, K., & SHEN, Z. J. M. (2021). A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. **Journal of Management Science and Engineering**, 6(2), 125-134.
- DÌNG, K., SHÌ, H., HUÌ, J., LÌU, Y., ZHU, B., ZHANG, F., & CAO, W. (2018, MARCH). Smart steel bridge construction enabled by BIM and Internet of Things in industry 4.0: A framework. **In 2018 IEEE 15th international conference on networking, sensing and control (ICNSC)** (pp. 1-5). IEEE.
- DOUGLAS, D., KELLY, G., & KASSEM, M. (2021). BIM, Digital Twin and Cyber-Physical Systems: crossing and blurring boundaries. **arXiv preprint arXiv:2106.11030**.
- EL MOKHTARÌ, K., PANUSHEV, I., & MCARTHUR, J. J. Development of a Cognitive Digital Twin for Building Management and Operations. **Frontiers in Built Environment**, 76.
- EL JAZZAR, M., PÌSKERNÌK, M., & NASSEREDDÌNE, H. (2020, JULY). Digital twin in construction: An empirical analysis. **In EG-ICE 2020 Workshop on Intelligent Computing in Engineering, Proceedings** (pp. 501-510).
- FENG, H., CHEN, Q., & DE SOTO, B. G. (2021). Application of digital twin technologies in construction: an overview of opportunities and challenges. **In ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction** (Vol. 38, pp. 979-986). IAARC Publications.
- FLAMÌNÌ, A., LOGGÌA, R., MASSACCESÌ, A., MOSCATIELLO, C., & MARTÌRANO, L. (2022, MAY). BIM and SCADA integration: the Dynamic Digital Twin. **In 2022 IEEE/IAS 58th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)** (pp. 1-7). IEEE.
- GREESHMA, A. S., & EDAYADÌYÌL, J. B. (2021). Advancement of Digital Twin Technology on transforming the Construction Industry.
- GUÌDA, C. G., GUPTA, B. B., LORUSSO, A., MARONGÌU, F., SANTANIELLO, D., & TROÌANO, A. (2021, DECEMBER). An Integrated BIM-IoT approach to support energy monitoring. **In International Conference on Smart Systems and Advanced Computing (Syscom-2021)**.

- HAN, T., MA, T., FANG, Z., ZHANG, Y., & HAN, C. (2022). A BIM-IoT and intelligent compaction integrated framework for advanced road compaction quality monitoring and management. **Computers and Electrical Engineering**, 100, 107981.
- HASAN, S. M., LEE, K., MOON, D., KWON, S., JINWOO, S., & LEE, S. (2022). Augmented reality and digital twin system for interaction with construction machinery. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, 21(2), 564-574
- HUANG, X., LIU, Y., HUANG, L., ONSTEIN, E., & MERSCHBROCK, C. (2023). BIM and IoT data fusion: The data process model perspective. **Automation in Construction**, 149, 104792.
- HOSAMO, H. H., IMRAN, A., CARDENAS-CARTAGENA, J., SVENNEVIG, P. R., SVIDT, K., & NIELSEN, H. K. (2022). A Review of the Digital Twin Technology in the AEC-FM Industry. **Advances in Civil Engineering**, 2022.
- JIANG, F., MA, L., BROYD, T., & CHEN, K. (2021). Digital twin and its implementations in the civil engineering sector. **Automation in Construction**, 130, 103838.
- KAEWUNRUEN, S., & XU, N. (2018). Digital twin for sustainability evaluation of railway station buildings. **Frontiers in Built Environment**, 4, 77.
- KAEWUNRUEN, S., & LIAN, Q. (2019). Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems. **Journal of Cleaner Production**, 228, 1537-1551.
- KAEWUNRUEN, S., PENG, S., & PHIL-EBOSIE, O. (2020). Digital twin aided sustainability and vulnerability audit for subway stations. **Sustainability**, 12(19), 7873.
- KIT, K. T. (2022). The paradigm of Digital Twin Application in Project Management in Architecture, Engineering and Construction. **International Journal of Civil and Architectural Engineering**, 16(4), 122-127.
- LAMAGNA, M., GROPPÌ, D., NEZHAD, V. V., & PIRAS, G. (2021). A comprehensive review on Digital Twins for smart energy management system.

International Journal of Energy Production and Management. 2021. Vol. 6. Iss. 4, 6(4), 323-334.

- LA RUSSA, F. M., & SANTAGATÌ, C. (2020). Historical sentient–building information model: a digital twin for the management of museum collections in historical architectures. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 43, 755-762.
- LEE, D., & LEE, S. (2021). Digital twin for supply chain coordination in modular construction. **Applied Sciences**, 11(13), 5909.
- LÌU, Z., ZHANG, A., & WANG, W. (2020). A framework for an indoor safety management system based on digital twin. **Sensors**, 20(20), 5771.
- LÌMA, C. M., FERREIRA, E. D. A. M., & CALMON, J. L. (2021). BIM and IoT Integration to Support Management Processes: an application for precast concrete systems. **The Journal of Modern Project Management**, 9(2).
- LÌ, J., KASSEM, M., CÌRÌBÌNÌ, A. L. C., & BOLPAGNÌ, M. (2019). A proposed approach integrating DLT, BIM, IOT and smart contracts: Demonstration using a simulated installation task. **In International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC) Driving data-informed decision-making** (pp. 275-282). ICE Publishing.
- LU, Q., CHEN, L., LÌ, S., & PÌTT, M. (2020). Semi-automatic geometric digital twinning for existing buildings based on images and CAD drawings. **Automation in Construction**, 115, 103183.
- LU, Q., XÌE, X., PARLÌKAD, A. K., SCHOOLÌNG, J. M., & KONSTANTÌNOU, E. (2020). Moving from building information models to digital twins for operation and maintenance. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Smart Infrastructure and Construction**, 174(2), 46-56.
- LU, Q., XÌE, X., PARLÌKAD, A. K., SCHOOLÌNG, J., & PÌTT, M. (2022). Digital Twins in the Built Environment: Fundamentals, principles and applications.
- MAFÌPOUR, M. S., VÌLGERTSHOFER, S., & BORRMANN, A. (2022). Creating digital twins of existing bridges through AI-based methods. In Proc. of the IABSE Symposium–Challenges for Existing and Oncoming Structures.

- MARTINS, P. N., PEREIRA, G., SANHUDO, L., & COSTA, A. A. Digital Twin para a gestão inteligente de edifícios: o caso do Smart Office do Built Colab.
- MENEGON, J., & ISATTO, E. L. (2023). Digital twins as enablers of structure inspection and maintenance. **Gestão & Produção**, 30.
- MORETTI, N., XIE, X., MERINO, J., BRAZAUSKAS, J., & PARLIKAD, A. K. (2020). An openbim approach to iot integration with incomplete as-built data. **Applied Sciences**, 10(22), 8287.
- OYARHOSSEIN, M. (2021). Building Health Monitoring of Hospital Facilities Supported by Digital Twins Models.
- OPOKU, D. G. J., PERERA, S., OSEI-KYEI, R., RASHIDI, M., FAMAKINWA, T., & BAMDAD, K. (2022). Drivers for Digital Twin Adoption in the Construction Industry: A Systematic Literature Review. **Buildings** 2022, 12, 113.
- OZTURK, G. B. (2021). Digital twin research in the AECO-FM industry. **Journal of Building Engineering**, 40, 102730.
- OSPINA-BOHÓRQUEZ, A., LÓPEZ-REBOLLO, J., MUÑOZ-SÁNCHEZ, P., & GONZÁLEZ-AGUILERA, D. (2022). A Digital Twin for Monitoring the Construction of a Wind Farm. **Engineering Proceedings**, 17(1), 3.
- OSPINA-BOHÓRQUEZ, A., LÓPEZ-REBOLLO, J., MUÑOZ-SÁNCHEZ, P., & GONZÁLEZ-AGUILERA, D. (2023). A Digital Twin for Monitoring the Construction of a Wind Farm. **Infrastructures**, 8(1), 10.
- PAN, Y., & ZHANG, L. (2021). A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management. **Automation in Construction**, 124, 103564.
- PAPYSHEV, G., & YARIME, M. (2021). Exploring city digital twins as policy tools: A task-based approach to generating synthetic data on urban mobility. **Data & Policy**, 3.
- QIUCHEN LU, V., PARLIKAD, A. K., WOODALL, P., RANASINGHE, G. D., & HEATON, J. (2019). Developing a dynamic digital twin at a building level: Using Cambridge campus as case study. **In International conference on**

smart infrastructure and construction 2019 (ICSIC) driving data-informed decision-making (pp. 67-75). ICE Publishing.

- RAHİMİAN, F. P., DAWOOD, N., GHAFARIANHOSEİNİ, A., & GHAFARIANHOSEİNİ, A. (2022). Guest editorial: Enabling the development and implementation of digital twins. **Construction Innovation**, 22(3), 405-411.
- RELEKAR, A., SMOLIRA, P., PETROVA, E., & SVİDT, K. (2021, OCTOBER). Enabling Digital Twin with Advanced Visualization and Contextualization of Sensor Data with BIM and Web Technologies. **In Proc. of the Conference CIB W** (Vol. 78, pp. 11-15).
- REJA, VARUN & VARGHESE, KOSHY. (2022). Digital Twin Applications for Construction Project Management.
- ROSATÌ, C. A., CERVO, A., & FANTUZZÌ, C. (2020, OCTOBER). Air quality monitoring in a BIM model by means of a IoT sensors network. **In 2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC)** (pp. 110-115). IEEE.
- ROBERTS, G., REEVELL, L., PLEACE, R., & GORSE, C. (2021). Management of Assets and Compliance through the Application of BIM and Digital Twins: A Platform for Innovation in Building Management.
- SALEM, T., & DRAGOMİR, M. (2022). Options for and Challenges of Employing Digital Twins in Construction Management. **Applied Sciences**, 12(6), 2928.
- SABBAGH, M. BIM and COBie for Facility Management. **Yapı Bilgi Modelleme**, 1(1), 10-20.
- SEPASGOZAR, S. M. (2021). Differentiating digital twin from digital shadow: Elucidating a paradigm shift to expedite a smart, sustainable built environment. **Buildings**, 11(4), 151.
- SCIANNA, A., GAGLIÒ, G. F., & LA GUARDIA, M. (2022). Structure Monitoring with BIM and IoT: The Case Study of a Bridge Beam Model. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, 11(3), 173.
- SCHWEİGKOFER, A., BRAHOLLİ, O., AKRO, S., SIEGELE, D., PENNA, P., MARCHER, C., ... & MATT, D. (2022, APRİL). Digital Twin as energy

- management tool through IoT and BIM data integration. **In CLIMA 2022 conference.**
- SHAHZAD, M., SHAFIQ, M. T., DOUGLAS, D., & KASSEM, M. (2022). Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. **Buildings**, 12(2), 120.
- SHAHINMOGHADAM, M., & MOTAMEDİ, A. (2019, MAY). Review of BIM-centred IoT Deployment–State of the Art, Opportunities, and Challenges. **In Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019)** (pp. 1268-1275).
- SHAHINMOGHADAM, M., MOTAMEDİ, A., & CHERİET, M. (2021). Applying machine learning and digital twinning for the live assessment of thermal comfort in buildings.
- SHAHINMOGHADAM, M., NATEPHRA, W., & MOTAMEDİ, A. (2021). BIM-and IoT-based virtual reality tool for real-time thermal comfort assessment in building enclosures. **Building and environment**, 199, 107905.
- SU, S., ZHONG, R. Y., & JIANG, Y. (2022). Digital twin and its applications in the construction industry: A state-of-art systematic review. **Digital Twin**, 2(15), 15.
- SUN, H., & LIU, Z. (2022). Research on intelligent dispatching system management platform for construction projects based on digital Twin and BIM technology. **Advances in Civil Engineering**, 2022
- SPUDYS, P., AFXENTIOU, N., GEORGALİ, P. Z., KLUMBYTE, E., JURELIONIS, A., & FOKAIDES, P. (2023). Classifying the operational energy performance of buildings with the use of digital twins. **Energy and Buildings**, 113106.
- TAN, Y., CHEN, P., SHOU, W., & SADICK, A. M. (2022). Digital Twin-driven approach to improving energy efficiency of indoor lighting based on computer vision and dynamic BIM. **Energy and Buildings**, 270, 112271.
- TAGLIABUE, L. C., CECCONI, F. R., MALTESE, S., RINALDI, S., CIRIBINI, A. L. C., & FLAMMINI, A. (2021). Leveraging digital twin for sustainability assessment of an educational building. **Sustainability**, 13(2), 480.

- TCHANA, Y., DUCELLIER, G., & REMY, S. (2019). Designing a unique Digital Twin for linear infrastructures lifecycle management. **Procedia CIRP**, 84, 545-549.
- TORRECILLA-GARCÍA, J. A., PARDO-FERREIRA, M. C., & RUBÍO-ROMERO, J. C. (2021). Overall introduction to the framework of BIM-based digital twinning in decision-making in safety management in building construction industry. **Dir. Organ**, 74, 31-38.
- VISARTSAKUL, B., & DAMRIANANT, J. (2023). A Review of Building Information Modeling and Simulation as Virtual Representations Under the Digital Twin Concept. **Engineering Journal**, 27(1), 11-27.
- WANG, W., GUO, H., LI, X., TANG, S., LI, Y., XIE, L., & LV, Z. (2022). BIM information integration based VR modeling in digital twins in industry 5.0. **Journal of Industrial Information Integration**, 28, 100351.
- WANG, W., GUO, H., LI, X., TANG, S., XIA, J., & LV, Z. (2022). Deep learning for assessment of environmental satisfaction using BIM big data in energy efficient building digital twins. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, 50, 101897.
- WENNER, M., MEYER-WESTPHAL, M., HERBRAND, M., & ULLERICH, C. (2021, OCTOBER). The concept of digital twin to revolutionise infrastructure maintenance: the pilot project smartBRIDGE Hamburg. In **27th ITS world congress, Hamburg, Germany** (pp. 11-15).
- WILDENAUER, A., MBABU, A., UNDERWOOD, J., & BASL, J. (2022). Building-as-a-service: theoretical foundations and conceptual framework. **Buildings**, 12(10), 1594.
- WU, L., LU, W., XUE, F., LI, X., ZHAO, R., & TANG, M. (2022). Linking permissioned blockchain to Internet of Things (IoT)-BIM platform for off-site production management in modular construction. **Computers in Industry**, 135, 103573.
- XIA, H., LIU, Z., MARÍA, E., LIU, X., & LIN, C. (2022). Study on city digital twin technologies for sustainable smart city design: A review and bibliometric

- analysis of geographic information system and building information modeling integration. **Sustainable Cities and Society**, 104009.
- YAN, J., ZHOU, J., LI, Y., CAO, X., SUN, Y., & LIU, B. (2022, MARCH). Research on intelligent pumped storage power station based on digital twins technology. **In Journal of Physics: Conference Series** (Vol. 2237, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.
- ZHANG, X., SHEN, J., SAINI, P. K., LOVATI, M., HAN, M., HUANG, P., & HUANG, Z. (2021). Digital twin for accelerating sustainability in positive energy district: a review of simulation tools and applications. **Frontiers in Sustainable Cities**, 3, 35.
- ZHANG, J., CHENG, J. C., CHEN, W., & CHEN, K. (2022). Digital twins for construction sites: Concepts, LoD definition, and applications. **Journal of Management in Engineering**, 38(2), 04021094.
- ZHENG, Z., LIAO, W., LIN, J., ZHOU, Y., ZHANG, C., & LU, X. (2022). Digital Twin-Based Investigation of a Building Collapse Accident. **Advances in Civil Engineering**, 2022.
- ZHAO, L., ZHANG, H., WANG, Q., & WANG, H. (2021). Digital-Twin-based evaluation of nearly zero-energy building for existing buildings based on scan-to-BIM. **Advances in Civil Engineering**, 2021.
- ZHAO, R., WU, Y., LOU, J., CHEN, Z., WU, L., XUE, F., ... & XUE, F. (2021, OCTOBER). Comparison of BIM Collaboration Paradigms for Digital Twin Readiness: Centralized Files, Decentralized Clouds, and Distributed Blockchains. **In Proc. of the Conference CIB W78** (Vol. 2021, pp. 11-15).
- ZHAO, J., GUO, L., & LI, Y. (2022). Application of Digital Twin Combined with Artificial Intelligence and 5G Technology in the Art Design of Digital Museums. **Wireless Communications and Mobile Computing**, 2022.
- ZHAO, Y., CAO, C., & LIU, Z. (2022). A Framework for Prefabricated Component Hoisting Management Systems Based on Digital Twin Technology. **Buildings**, 12(3), 276.
- ZHAO, J., FENG, H., CHEN, Q., & DE SOTO, B. G. (2022). Developing a conceptual framework for the application of digital twin technologies to revamp building

operation and maintenance processes. **Journal of Building Engineering**, 49, 104028.

ZHOU, Y., WEI, X., & PENG, Y. (2021). The modelling of digital twins technology in the construction process of prefabricated buildings. **Advances in Civil Engineering**, 2021.

ZHOU, L., AN, C., SHI, J., LV, Z., & LIANG, H. (2021, AUGUST). Design and construction integration technology based on digital twin. **In 2021 Power System and Green Energy Conference (PSGEC)** (pp. 7-11). IEEE.

ELEKTRONİK KAYNAKLAR

URL-1 <https://www.idecad.com.tr/portfolio-type/ideidecad-yapi-ids-v10/daha-fazlasi/> (Erişim Tarihi: 31 Ekim 2023)

URL-2 <https://buildext.com/en/bim-dimensions/> (Erişim Tarihi: 31 Ekim 2023)

URL-3 https://www.b3lab.org/sayfa/sanal_kopyamiz_dijital_ikizler-85 (Erişim Tarihi: 31 Ekim 2023)

TEZLER

AKGÜN, A (2016). “Yüklenici İnşaat Firmalarında Hakediş Düzenlemeleri ve Yapı Enformasyonu Modellemesi (BIM) Uygulamaları”, (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi), Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi.

ÖZGEÇMİŞ

AD-SOYAD : Esra SARIAY

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans: 2021, İstanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Fakültesi, (3.12/4.00).

Yüksek Lisans: 2024, İstanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programı, (3.88/4.00).

YAYINLAR

SARIAY, E., & DEMİRKESEN, S. (2023). Türk İnşaat Firmalarında BIM ile Dijital İkizin Benimsenmesi. 10. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi. 14-15 Ekim 2023 İSTANBUL, s.134-143

SARIAY, E., CÖRÜT, A., & BÜYÜKAKINCI, B. Y. (2023). Miselyum Kompozitlerinin Sürdürülebilir Yapı Malzemesi Olarak Kullanımı. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 14(1), 196-207. <https://doi.org/10.29048/makufebd.1228676>

DEHGHANIAN, K., & SARIAY, E. (2022). Geosentetik Kil Örtülerin Fiziksel ve Mekaniksel Özellikleri. İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi, 3(1), 34-56. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/imctd/issue/71276/1059615>

