

**YAPI BİLGİ MODELLEME'DEN DİJİTAL İKİZ' E DOĞRU:
AKILLI TESİS YÖNETİMİNİ ETKİNLEŞTİRME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Moutaman Mert HOCAOĞLU

Enformatik Anabilim Dalı

Mimari ve Kentsel Enformatik

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ümit Işıkdag

ARALIK, 2022

MİMAR SİNAN GÜZEL SANATLAR ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPI BİLGİ MODELLEME'DEN DİJİTAL İKİZ'E DOĞRU:
AKILLI TESİS YÖNETİMİNİ ETKİNLEŞTİRME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Moutaman Mert HOCAOĞLU

Enformatik Anabilim Dalı

Mimari ve Kentsel Enformatik

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ümit Işıkdag

ARALIK, 2022

Moutaman Mert HOCAOĞLU tarafından hazırlanan Yapı Bilgi Modelleme'den Dijital İkiz'e Doğru: Akıllı Tesis Yönetimini Etkinleştirme adlı bu tezin tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

.....
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Anabilim Dalında tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : _____

Üye : _____

Üye : _____

Üye : _____

Üye : _____

Bu tez, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım klavuzuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında.

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel etik kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ücret karşılığı başka kişilere yazdırmadığımı (dikte etme dışında), uygulamalarımı yaptırmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

Moutaman Mert HOCAOĞLU

ÖNSÖZ

Bu çalışma sürecinde ve yüksek lisans eğitimi boyunca bilgisi, deneyimleri ve önerileri ile yol gösteren danışmanım Prof. Dr. Ümit Işıkdağ'a,

Yüksek lisans eğitimi boyunca bilgisi, değerli katkıları, eleştirileri ve yorumları için Prof. Dr. Salih Ofluoğlu,

Tüm öğrenim hayatım boyunca bana desteklerini esirgemeyen annem Hwida Khouja,

Bülent Ekuklu, Microsoft

Büşra Yılmaz, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

Candan Erim, Limak İnşaat

Ersoy Pehlivan, Arup

Guillaume Estegassy, Microsoft

Juan Tena, KEO International Consultants

Lola Carbajal Moro, Foster + Partners

Milena Marucci, Foster + Partners

Oğuz Ozan, Oracle

Vangel Kukov, Foster + Partners

sonsuz teşekkür ederim.

Moutaman Mert HOCAOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xix
1. GİRİŞ	23
1.1 Çalışmanın Amacı ve Önemi	24
1.2 Hipotez ve Araştırma Soruları.....	24
1.3 Kavramsal Çerçeve.....	25
1.4 Araştırma Metodolojisi	26
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ	27
2.1 BIM, Tesis Yönetimi ve Dijital İkiz.....	27
2.1.1 Yapı Bilgi Modellemesi (BIM).....	27
2.1.2 Tesis Yönetimi (FM).....	31
2.1.3 İnşaat Operasyonları Bina Bilgi Değişimi (COBie)	32
2.1.3.1 Tasarım	33
2.1.3.2 Ortak	34
2.1.3.3 Yapı.....	34
2.1.4 Nesnelerin İnterneti (IoT)	35
2.1.5 Bulut Bilişim	37
2.1.6 Dijital İkiz (DT)	39
2.1.6.1 Dijital İkizin Kökenleri	39
2.1.6.2 İkizler Prensipleri.....	39
2.1.6.3 Dijital İkizler Ekosistemi	40
2.1.6.4 Dijital İkiz Olgunluk Öğeleri	42
2.1.6.5 Dijital İkiz Mimarisi	44
2.2 BIM'den Dijital İkize.....	46
2.2.1 BIM Tabanlı FM	46
2.2.1.1 Uygulamalar ve Zorluklar	46
2.2.1.2 Operasyon ve Bakım (O&M).....	47
2.2.1.3 Acil Durum ve Güvenlik Yönetimi.....	48
2.2.1.4 Enerji Yönetimi.....	49
2.2.1.5 Özet	49
2.2.2 BIM-IoT Yabancı FM.....	50
2.2.2.1 Uygulamalar ve Zorluklar	50
2.2.2.2 Operasyon ve Bakım (O&M).....	50
2.2.2.3 İç Mekân Termal Konfor	51
2.2.2.4 Enerji Yönetimi.....	52

2.2.2.5 Acil Durum ve Güvenlik Yönetimi.....	52
2.2.2.6 Özet.....	52
2.2.3 Bulut Tabanlı Dijital İkiz	53
2.2.3.1 Uygulamalar ve Zorluklar.....	53
2.2.3.2 Operasyon ve Bakım (O&M).....	55
2.2.3.3 İç Mekân Termal Konfor	55
2.2.3.4 Proje İş Birliği.....	55
2.2.3.5 Özet.....	56
2.2.4 BIM, FM, IoT ve AI.....	56
2.2.4.1 Uygulamalar ve Zorluklar.....	56
2.2.4.2 İşletme ve Bakım (O&M)	57
2.2.4.3 İç Mekan Termal Konfor	57
2.2.4.4 Enerji Yönetimi.....	57
2.2.4.5 Acil Durum ve Güvenlik Yönetimi.....	57
2.2.4.6 Özet.....	58
2.3 Sonuç	59
3. VAKA ÇALIŞMASI	61
3.1 BIM Katmanı (As-Built BIM Model)	63
3.1.1 COBie Parametre Eşleme.....	64
3.1.1.1 COBie Kişileri.....	64
3.1.1.2 COBie Türü.....	65
3.1.1.3 COBie Kurulum Projesi	66
3.1.1.4 COBie Bölge Yöneticisi.....	67
3.1.1.5 COBie Seçimi	68
3.1.1.6 COBie Güncellemesi.....	68
3.1.1.7 Revit'te COBie Parametre Eşleme	69
3.1.2 Sınıflandırma Yönetim Sistemleri Parametre Eşleme.....	70
3.2 Veri Toplama ve İzleme Katmanı (IoT İç Ortam Kalite İzleme Sistemi)	72
3.2.1 İç Mekan Hava Kalitesi (IAQ).....	74
3.2.1.1 Partikül Madde (PM)	74
3.2.1.2 Karbon Dioksit (CO ₂).....	77
3.2.2 Termal Konfor.....	79
3.2.2.1 Tahmini Ortalama Oy (PMV)	79
3.2.2.2 Tahmini Memnuniyetsizlik Yüzdesi (PPD).....	82
3.2.3 Görsel Konfor.....	84
3.2.4 Akustik Konfor.....	86
3.3 Veri İşleme Katmanı (IoT Bulut Platformu)	88
3.4 Entegrasyon Katmanı	91
3.5 Görselleştirme ve Analiz Katmanı (Unreal Engine)	96
3.5.1 İç Mekan Hava Kalitesi (IAQ).....	98
3.5.2 Termal Konfor.....	99
3.5.3 Görsel Konfor.....	100
3.5.4 Akustik Konfor.....	102
3.5.5 Asansörde Sosyal Mesafe	103
3.5.6 Sesli Asistanı Kullanan Akıllı Tesis Yönetimi	104
4. SONUÇ.....	105
KAYNAKLAR.....	113
EKLER.....	121
ÖZGEÇMİŞ.....	123

KISALTMALAR

AEC	: Architecture, Engineering, and Construction
AI	: Artificial Intelligence
AIA	: American Institute of Architects
AQI	: Air Quality Index
API	: Application Programming Interfaces
AR	: Augmented Reality
BAS	: Building Automation System
BDS	: Building Description System
BEMS	: Building Energy Management Systems
BIM	: Building Information Modeling
BLM	: Building Lifecycle Management
BMS	: Building Management System
BSI	: British Standards Institution
CAD	: Computer-Aided Design
CDBB	: Centre for Digital Built Britain
CMMS	: Computerized Maintenance Management Information System
COBie	: Construction Operations Building Information Exchange
DMADV	: Define-Measure-Analyze-Design-Verify
DT	: Digital Twin
ETTB	: Envelope Thermal Transfer Value
FDD	: Fault Detection and Diagnosis
FM	: Facility Management
GIS	: Geographic Information System
IaaS	: Infrastructure as a service
IAQ	: Indoor Air Quality
IEQ	: Indoor Environmental Quality
IET	: Institution of Engineering and Technology
IFC	: Industry Foundation Classes
IoT	: Internet of Things
LiDAR	: Laser Detection and Ranging
ML	: Machine learning
MQTT	: Message Queuing Telemetry Transport
NBS	: National Building Specification
NDT	: National Digital Twin
O&M	: Operation and Maintenance
PaaS	: Platform as a service
PBO-I	: Plan-Build-Operate-Integrate Water Assessment Tool
PLM	: Product Lifecycle Management
PM	: Particulate Matter
PMV	: Predicted Mean Vote
POE	: Post-Occupancy Evaluation
PPD	: Predicted Percentage of Dissatisfied
REST	: Representative State Transfer
RFID	: Radio Frequency Devices
RIBA	: Royal Institute of British Architects
SaaS	: Software as a service

SoC : System-on-Chip
SQL : Structured Query Language
UI : User Interface
UX : User Experience
VR : Virtual Reality
WSN : Wireless Sensor Network

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1: “Bina Tasarımında Çizim Yerine Bilgisayar Kullanımı” bölümünde açıklanan BDS sistemi Kaynak: (Eastman, 1975)	27
Şekil 2: BIM Boyutları Kaynak: (Building the Digital, 2018).....	28
Şekil 3: BIM Olgunluk Düzeyleri Kaynak: (British Standards Institution, 2014).....	29
Şekil 4: AEC Kuruluşları Arasında BIM Benimseme ve Uygulama Yaklaşımı Kaynak: (National Building Specification, 2021).....	30
Şekil 5: BIM'in Kabulünün Faydaları Kaynak: (National Building Specification, 2020)	30
Şekil 6: BIM'in Kabulünün Zorlukları Kaynak: (National Building Specification, 2020)	31
Şekil 7: COBie Yapısı Kaynak: Autodesk	34
Şekil 8: 2015'ten 2025'e kadar küresel olarak bağlı IoT cihazlarının sayısı Kaynak: (IoT Analytics, 2022).....	35
Şekil 9: IoT Kabulünün Faydaları Kaynak: (Microsoft, 2021).....	36
Şekil 10: IoT Kabulünün Zorlukları Kaynak: (Microsoft, 2021).....	36
Şekil 11: Bulut Benimseme Kaynak: (Flexera, 2022)	38
Şekil 12: Bulutu Benimseme Kaynak: (Flexera, 2022)	38
Şekil 13: Michael Grieves tarafından PLM için kavramsal ideal Kaynak: (Grieves, 2006)	39
Şekil 14: İkizler Prensipleri Kaynak: (Centre for Digital Built Britain, 2018).....	40
Şekil 15: Yapılı çevre için Dijital İkiz Olgunluk Ögesi Kaynak: (Institution of Engineering and Technology (IET), 2019).	42
Şekil 16: Dijital İkiz Kavramsal Mimari Kaynak: (Parrott & Warshaw, 2017)	45
Şekil 17: Tesis Yaşam Döngüsü Üzerinden BIM Grafik Bilgileri ve Nitelik Verilerinin Önemi Kaynak: (P. M. Teicholz & IFMA Foundation., 2013).....	47
Şekil 18: Çoğu AEC Endüstri Profesyoneli Tarafından Kullanılan Teknolojiler Kaynak: (NBS 10th Annual BIM Report, 2020)	54
Şekil 19: Dijital İkiz çerçeve seviyeleri	62
Şekil 20: Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Bomonti Kampüsü, Revit BIM modeli.....	63
Şekil 21: Revit için COBie Uzantısı. BIM Birlikte Çalışabilirlik Araçları Araç Çubuğu Menüünden	64
Şekil 22: COBie Kişileri Penceresi	65
Şekil 23: COBie Type Penceresi.....	66
Şekil 24: COBie Kurulum Penceresi, Parametre Eşlemeleri	67
Şekil 25: COBie Bölge Yöneticisi Penceresi	67
Şekil 26: COBie Seçim Penceresi.....	68
Şekil 27: COBie Güncelleme Penceresi.....	69
Şekil 28: Mekanik Ekipman için COBie Tipi Seviye Parametresi (Sol), COBie Örnek Seviyesi Parametresi (Sağ).....	70
Şekil 29: Revit için Autodesk Standardize Veri Aracı.....	71
Şekil 30: Revit'te bir Mekanik Ekipman için Yönetim Sınıflandırma Sistemleri Verilerinin Haritalanması.....	72
Şekil 31: ESP32 çip üzerinde sistem (SoC) mikrodenetleyici	73
Şekil 32: PM Parçacıkları için Boyut Karşılaştırmaları Kaynak: (U.S. Environmental Protection Agency, 2020)	75

Şekil 33: Partikül Madde (PM2.5) Hava Kalitesi Sensörü.....	77
Şekil 34: MG811 Karbon Dioksit (CO2) Sensörü	79
Şekil 35: PMV'nin fonksiyonu olarak PPD Kaynak:(ISO, 2005)	83
Şekil 36: BME280 Sıcaklık, Nem ve Basınç Sensörü	83
Şekil 37: TSL2591 Işık Sensörü.....	86
Şekil 38: KY-037 Ses Sensörü	87
Şekil 39: Arduino IoT Bulut IDE Web Düzenleyicisi	89
Şekil 40: Arduino IoT Bulut IDE Panoları.....	89
Şekil 41: Veri İşleme Katmanı İş Akışı	90
Şekil 42: Revit'te IoT Paylaşılan Parametreler Grubu	91
Şekil 43: Revit'te IoT Örnek Parametreleri	92
Şekil 44: Arduino IoT Cloud'da Cihaz Kimliği ve Adı (Sol), Sıcaklık Sensörü Kimliği ve Adı (Sağ)	93
Şekil 45: Revit'te Cihaz ve Sensör Bilgilerini Eşleştirme	93
Şekil 46: Unreal Engine'de Cihaz ve Sensör Bilgilerini Eşleştirme	94
Şekil 47: COBie Verileri ve Yönetim Sınıflandırma Sistemleri Verilerini Eşleştirme	94
Şekil 48: Veri Entegrasyon Katmanı İş Akışı	95
Şekil 49: Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Bomonti Yerleşkesindeki Bilişim Laboratuvarı İçin Dijital İkizler modeli (Birinci Şahıs Bakış Görüntüsü).....	96
Şekil 50: CO2 Sensörü Arduino IoT Cloud'a Veri Göndermiyor	97
Şekil 51: Unreal Engine Dashboard - İç Mekan Hava Kalitesi.....	99
Şekil 52: Unreal Engine Dashboard - Termal Konfor.....	100
Şekil 53: Unreal Engine Dashboard - Görsel Konfor	101
Şekil 54: Unreal Engine Dashboard - Akustik Konfor	102
Şekil 55: Unreal Engine Dashboard - Asansörde Sosyal Mesafe	103
Şekil 56: Arduino IoT Cloud – Alexa Voice AI Cihazı	104
Şekil 57: Windows İşletim Sistemi İçin Geliştirilmiş Dijital İkiz Uygulaması (Perspektif Kamera Görüntüsü)	109
Şekil 58: Faydalılık, kullanım kolaylığı, öğrenme kolaylığı ve memnuniyete göre katılımcı anketi oylarının yüzde oranı.....	112

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1: Yapılı çevre için Dijital İkiz Olgunluk Ögesi.....	43
Tablo 2: İç Mekan Hava Kalitesi Sensörleri	73
Tablo 3: Hava Kalitesi İndeksi (AQI) ve PM2.5 Hava Kirliliği Kaynak: (U.S. Environmental Protection Agency, 2014).....	77
Tablo 4: BS EN16798-1:2019 iç ortam havası için CO2 konsantrasyonu kılavuz değerleri Kaynak: (British Standards Institution, 2019a)	78
Tablo 5: Termal algı ile PMV indeks ölçekleri Kaynak: (ISO, 2005).....	80
Tablo 6: Tipik Görevler İçin Metabolizma Hızları Kaynak: (ASHRAE, 2021).....	81
Tablo 7: UNE EN 12464-1:2022 Eğitim binaları için iç mekanlar, görevler ve faaliyetler için aydınlatma gereksinimleri Kaynak: (European Standard, 2022).....	85
Tablo 8: EN 15251:2007 Eğitim binaları için ses basınç seviyesi iç mekan sistem gürültü kriterleri Kaynak: (European Standard, 2007)	87
Tablo 9: Yönlü Grafikler - Partikül Madde (PM2.5)	98
Tablo 10: Yönlü Grafikler - Karbon Dioksit (CO2)	98
Tablo 11: Yönlü Grafikler - Tahmini Ortalama Oy (PMV).....	99
Tablo 12: Yönlü Grafikler - Aydınlık (lux)	100
Tablo 13: Yönlü Grafikler - UV İndeksi.....	101
Tablo 14: Yönlü Grafikler - Ses Basıncı Seviyesi (dB) Kaynak: (European Standard, 2022)	102
Tablo 15: Asansörde Kalabalık (Kişi).....	103

Yapı Bilgi Modelleme'den Dijital İkiz'e Doğru: Akıllı Tesis Yönetimini Etkinleştirme

ÖZET

Yapı Bilgi Modellemesinin (BIM), Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Yapay Zeka (AI) gibi dördüncü endüstriyel devrim teknolojileri ile entegrasyonu, mimarlık, mühendislik ve inşaat alanlarında “dijital ikiz” kavramının ortaya çıkmasına yol açmıştır.

Dijital ikiz, gerçek dünyadaki fiziksel bir tesisi, bağlı sensörlerden ve akıllı IoT cihazlarından toplanan gerçek zamanlı verilerle senkronize ederek, tesis yönetimine farklı bir boyut katmakta ve yeni bir akıllı tesis yönetimi anlayışına yol açmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, gerçek dünyadaki fiziksel bir tesisi, örnek olarak seçilen İstanbul'un Şişli ilçesinde bulunan Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Bomonti Yerleşke Binası üzerinden, gerçek zamanlı olarak sanal bir platform ile senkronize ederek BIM ve IoT'yi bütünleştiren bulut tabanlı dijital ikiz bir platform geliştirmektir.

Ayrıca, geliştirilen bu dijital ikiz platformla, örnek olarak seçilen tesisin İç Mekan Çevre Kalitesi'nin gerçek zamanlı olarak görselleştirilmesi ve izlenmesi planlanmaktadır. Tesis sahiplerinin ve yöneticilerin tesisi yönetmek için akıllı kararlar vermelerini desteklemek ve bu konuda onlara yardımcı olmak amacıyla, İç Mekan Hava Kalitesi, termal, görsel ve akustik konfor verileri de bunlara dahil edilmektedir.

Son olarak, bulut ve IoT sensörleri arasındaki iki yönlü entegrasyon, dijital ikiz ve gerçeklikte iç ortamı izlemek ve kontrol etmek için sensörlerle iletişim kuracak olan ses asistanı ile desteklenmektedir.

Üniversite binası için dijital ikiz modeli, Mühendislik ve Teknoloji Enstitüsü'nün (IET) Dijital İkiz olgunluk unsurları ölçeği 4'e göre geliştirildi.

Anahtar Kelimeler:

Yapay Zeka, Makine Öğrenmesi, AI, Yapı Bilgi Modellemesi, BIM, Tesis Yönetimi, Nesnelerin İnterneti, IoT, Bulut, Dijital İkiz

From BIM towards Digital Twin: Enabling Smart Facility Management

ABSTRACT

The integration of Building Information Modeling (BIM) with the fourth industrial revolution technologies like Internet of things (IoT) and Artificial intelligence (AI) has led to the emergence of the concept of the Digital twin in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry.

Digital twin adds an extra dimension to Facility Management (FM) by synchronizing a real-world physical building with real-time data harvested from connected sensors and smart IoT devices, opening a new understanding of smart FM.

The purpose of this study is to develop a digital twin cloud-based platform which integrates BIM and IoT in order to synchronize a real-world physical building which is the Bomonti Campus of Mimar Sinan Fine Art University which located in the district of Şişli in Istanbul, Turkey with a virtual platform in real time.

In addition, the digital twin platform will visualize and monitor the Indoor Environmental Quality (IEQ) using Unreal Engine 5 for the building in real time for the Indoor Air Quality (IAQ), thermal comfort, visual comfort and acoustic comfort to support and help the facilities' owners and managers to make a smart decision.

Finally, Two-way integration between the cloud and IoT sensors supported with voice assistance that will communicate with sensors for monitoring and controlling the indoor environment in the digital twin and reality.

The digital twin model for the university building was developed according to the the Digital Twin maturity elements scale 4 of the Institution of Engineering and Technology (IET).

Keywords

Artificial Intelligence, Machine Learning, AI, Building Information Modeling, BIM, Facility Management, Internet of things, IoT, Cloud, Digital Twin,

1. GİRİŞ

Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), bu modelde oluşturulan tüm elemanların boyut, malzeme, eleman özellikleri ve binanın koordinat değerleri (X, Y, Z) gibi verilerini içeren parametrik bir 3B model oluşturma işlemidir.

Bu BIM modeli, projenin yaşam döngüsü boyunca kullanılacak bir veri tabanı oluşturan bir tesis hakkındaki tüm bilgiler için paylaşılan veri kaynakları olarak işlev görmektedir.

Tasarımın başlangıcından inşaatın sonuna kadar olan aşamalar normalde 2-6 yıl alırken, bina ömrü otuz yıl veya daha fazla olabilir, bu nedenle BIM, kullanılacak organize bir veri üretmek için önemli bir rol oynamaktadır. Bu binayı uzun vadede yönetmektedir.

Ancak BIM, ek veri kaynakları kullanmadan yalnızca yapı ortamının kaydedildikten sonra değişmeyen statik verilerini sağlayabilmekte ama yapı bilgilerini otomatik veya gerçek zamanlı olarak güncelleyememektedir.

Öte yandan, dijital ikiz, yerleşik bir varlığın veya ortamın dinamik bir güncel dijital kopyası olan fiziksel bir nesnenin dijital bir temsilidir. Dijital ikiz, tasarımdan üretime, hizmet ve operasyonlara kadar tüm Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimini (PLM) alt üst etmektedir.

Statik veri modellerinden farklı olarak dijital ikizler, gerçek zamanlı olarak otomatik olarak güncellenebilen dinamik veriler sağlamaktadır. Ek olarak, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Yapay Zeka (AI) kullanılarak varlığın yaşam döngüsü boyunca veri alışverişini yaparak fiziksel muadilleriyle iletişim kurmak için kullanılabilir.

BIM, IoT ve AI'yı Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat (AEC) endüstrisinde entegre etmek, dördüncü sanayi devrimi teknolojilerinden yararlanabilen ve AEC'nin dijital dönüşümünü yönlendirebilen güçlü bir dijital ikiz iş akışı oluşturabilmektedir.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Önemi

Bu çalışmanın amacı, gerçek dünyadaki bir fiziksel binayı, gerçek zamanlı olarak sanal bir platformla senkronize etmek için BIM ve IoT'yi entegre eden ve iç mekan termal konforunu ve iç mekan ve ortamı izlemeye yardımcı olan bulut tabanlı dijital ikiz bir platform geliştirmektir.

Dijital ikiz model oluşturmak için şu adımlar izlenmiştir. İlk olarak, BIM modelini IoT sensörlerinden gelen gerçek zamanlı dinamik verilerle entegre etmek için Unreal Engine 5 kullanılmıştır. Ardından, Unreal Engine, tesis sahiplerinin ve yöneticilerinin tesisi yönetmek için akıllı kararlar vermelerini desteklemek ve onlara yardımcı olmak için İç Mekan Çevre Kalitesini (IEQ) gerçek zamanlı olarak görselleştirmek ve izlemek için kullanılmıştır. Son olarak, Arduino IoT Bulut, sensörlerle iletişim kurmak ve dijital ikizde ve gerçeklikte iç ortamı izlemek ve kontrol etmek için, AI ses yardımı ile entegre edilmiştir.

Önerilen çerçeve, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Bomonti Kampüsü'nün örnek olay incelemesi üzerinde test edilmiş ve doğrulanmıştır. Bu çalışmanın gelecekte bu alanda yapılacak araştırmalara temel oluşturması planlanmaktadır.

1.2 Hipotez ve Araştırma Soruları

Bu araştırmanın hipotezi, BIM'in statik verilerini dijital ikiz dinamik verilere dönüştüren bir iş akışı oluşturmak için İşletme ve Bakım aşamasında BIM, IoT, Bulut ve AI entegrasyonunu incelemektir. Aynı zamanda tesisi izlemek ve yönetmek ve iç mekan termal konforunu ölçmektir.

Bu araştırma önerisi aşağıdaki sorulara cevaplar bulmaya çalışmaktadır:

- BIM, gerçek zamanlı operasyonel geri bildirim vermek için mi tasarlandı?
- Karar vermeyi mekanizmalarını desteklemek için gerçek zamanlı veriler BIM modelinde nasıl görselleştirilebilir?
- BIM, Nesnelerin İnterneti, Bulut ve Yapay Zeka, daha akılcı bir Tesis Yönetimi yapılmasına nasıl yardımcı olabilir?

- İç Mekan Çevre Kalitesini görselleştirmek ve izlemek için BIM, Nesnelerin İnterneti, Bulut ve Yapay Zeka teknolojileri nasıl birer araç olarak kullanılabilir?
- Dijital İkizler’de BIM, IoT, Bulut ve AI teknolojilerinin katkısı nedir?

1.3 Kavramsal Çerçeve

Bina, 20 yıl önce, nihai inşa durumunu yansıtmayan CAD çizimleri kullanılarak inşa edilmiştir. As-built edilmiş BIM modeli, bu çalışmanın gerçekleştirilmesinden hemen önce yapılmış olup, bu düzeydeki çalışmalar, tasarım aşamasında oluşturulan ve inşaat aşamasında güncellenen ve ardından tesis operatörlerine aktarılan statik veriler olarak BIM’i kullanmaktadır. Bu statik veriler, temel çalıştırma ve bakım bilgilerini sağlamakta, ayrıca ekipmanın teknik özellikleri, kurulumu, bakım programı, kullanım ömrü ve kullanım kılavuzları hakkındaki tüm bilgileri içermektedir.

Bu çalışmanın başlıca sınırlamaları şunlardır:

1.3.1.1 Model Doğruluğu

Bina, 20 yıl önce, nihai inşa durumunu yansıtmayan CAD çizimleri kullanılarak inşa edilmiştir. As inşa edilmiş BIM modeli, modelin mevcut durumunu yansıtmak için bu çalışmanın gerçekleştirilmesinden hemen önce, daha az doğruluğa sahip lazer tarayıcılarla değil, geleneksel anket araçlarıyla yapılmıştır.

1.3.1.2 Bulut Bilişim Hizmetleri

Bulut bilişim hizmetleri hızlı, kolay ve güvenilir çözümler sunarken, diğer yandan pahalı olmaları ve öğrenci sürümlerinin sınırlı ve daha az özellik sunması bu çalışmanın sonuçlarını etkilemektedir.

1.4 Araştırma Metodolojisi

Bu araştırmaya, ilk olarak bir BIM modelinden dijital ikiz model oluşturma hakkında genel bir bakış sunmak için başlanmış ve ardından kapsam ve hedeflere ilişkin bir sorun bildirimini yapılmıştır.

İkinci bölüm olan Literatür Taraması iki alt bölümden oluşmaktadır. İlk alt bölüm, BIM, Tesis Yönetimi, IoT, Bulut, AI ve Dijital ikiz terimlerinin arka plan bilgileri ve temel tanımları dahil olmak üzere çok çeşitli ilgili bilgileri kapsamaktadır. İkinci alt bölüm, mevcut bilgileri keşfetmek, eğilimleri, yöntemleri, zorlukları ve boşlukları belirlemek için ilgili alanlardaki önceki çalışmaların ve projelerin gözden geçirilmesini kapsamaktadır.

Üçüncü bölüm olan Vaka Çalışması, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Bomonti Kampüsü için dijital ikiz modelin oluşturulmasını anlatmaktadır. Literatür incelemelerinden özetlenen iş akışının ardından, Bomonti Kampüsü için bir dijital ikiz oluşturmak için beş katmandan oluşan bir çerçeve önerilmiş ve ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Çerçevenin beş katmanı, BIM Katmanı, Veri Toplama ve İzleme Katmanı, Veri İşleme Katmanı, Veri Entegrasyon ve Görselleştirme Katmanı ve Veri Simülasyon ve Analiz Katmanı'dır.

Dördüncü bölüm olan Vaka Çalışması, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Bomonti Kampüsü olan vaka çalışması projesinin as-built BIM modelinin oluşturulmasını, kurulan cihaz ve sensörleri, sensörlerden toplanan verileri ve bunları bulut platformuna göndermeyi anlatmaktadır. Ardından tesis faaliyetlerini iyileştirmek, yönetim verimliliğini artırmak, İşletme ve Bakım aşamasında tesisi izlemek ve kontrol etmek ve tesis yöneticilerinin İç Mekan Çevre Kalitesini iyileştirmeye yönelik karar vermesini desteklemek için yeni bir işlevsellik sağlamak için bulut, AI, IoT tesis yönetim sistemleri entegrasyonu ile BIM yapılmıştır. (IEQ), İç Hava Kalitesi (IAQ), termal konfor, görsel konfor ve akustik konfor gibi birçok faktör tarafından belirlenmektedir.

Dördüncü bölüm olan Sonuç, vaka çalışması sonuçlarını, çıkarımları, gözlemleri ve bu çalışmadan çıkarılan önerileri özetlemekte ve gelecekteki araştırma alanlarını tartışmaktadır.

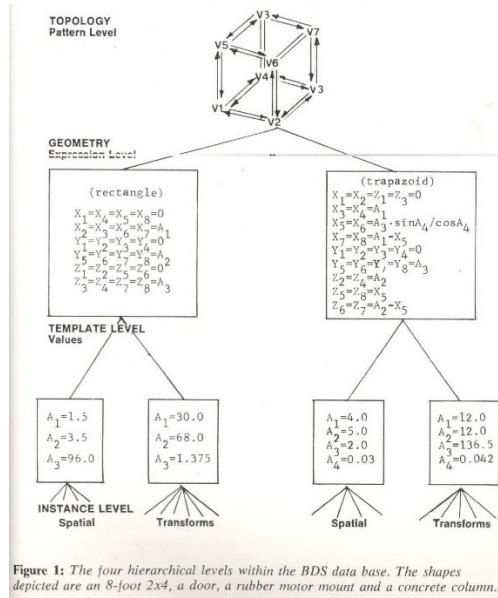
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1 BIM, Tesis Yönetimi ve Dijital İkiz

İlk alt bölüm, BIM, Tesis Yönetimi, IoT, Bulut Bilişim ve Dijital İkiz terimlerinin arka plan bilgileri ve temel tanımları dahil olmak üzere geniş bir kapsamda ilgili bilgileri kapsamaktadır.

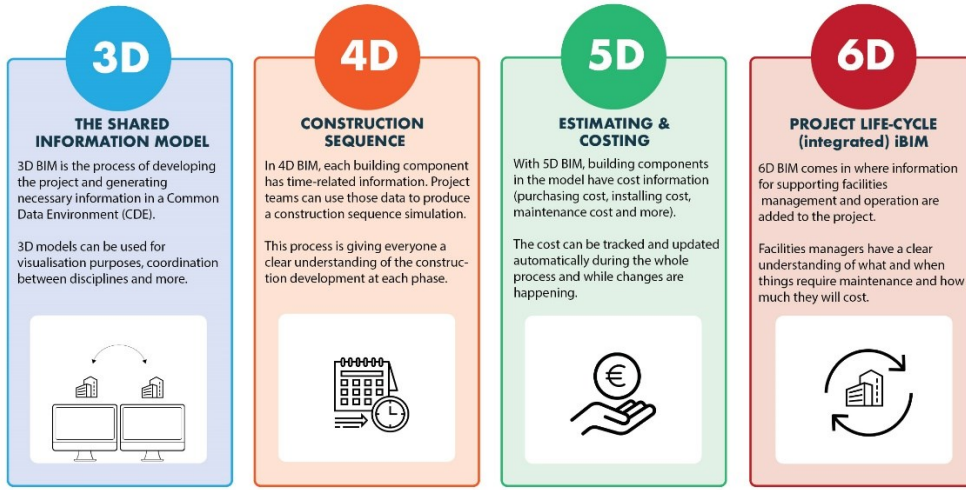
2.1.1 Yapı Bilgi Modellemesi (BIM)

BIM'in temeli, Charles M. Eastman'ın "Bina Tasarımında Çizimler Yerine Bilgisayarların Kullanımı" adlı bir makale yayınladığı 1975 yılına dayanmaktadır (Eastman, 1975). Bu makale, aynı belgede birleştirilmiş veritabanı ile 3B geometri olan Bina Tanımlama Sistemi (BDS) adlı bir prototip sunmaktadır. Makale temel olarak BIM'i günümüzde bildiğimiz şekliyle tanımlamaktadır.



Şekil 1: "Bina Tasarımında Çizim Yerine Bilgisayar Kullanımı" bölümünde açıklanan BDS sistemi
Kaynak: (Eastman, 1975)

BIM boyutları, binanın yaşam döngüsü boyunca BIM modelinde barındırılan bilgilerin belirli bir yolla ifade etmektedir.



Şekil 2: BIM Boyutları
Kaynak: (Building the Digital, 2018)

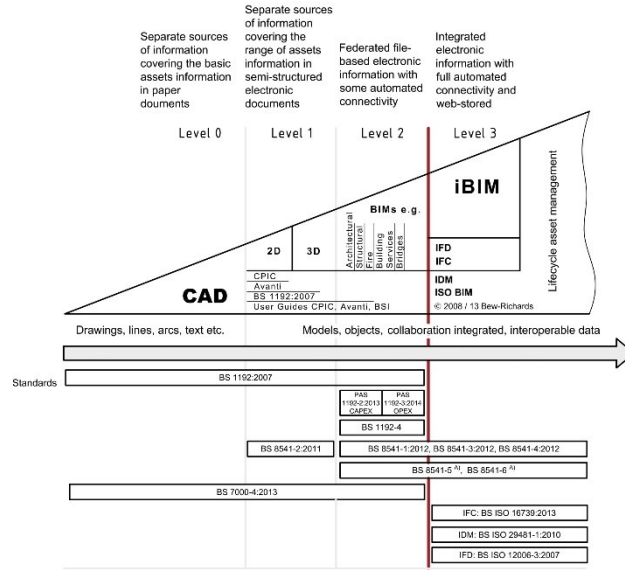
BIM Olgunluk Düzeyleri, dijital olarak bilgi alışverişi yapma becerisini ve disiplinler arasındaki işbirliği derecelerini açıklayan sıfır ile üç arasında bir aralıkta tanımlanmıştır.

Seviye 0: Bu seviye, çizimlerin en eski halidir. Bunlar kağıt üzerine çizimler veya basit dijital 2D CAD çizimleri olabilmekte ve herhangi bir işbirliği türü içermemektedir. Çoğu kuruluş artık bu düzeyi kullanmamaktadır.

Seviye 1: Bu seviye, günümüzde en yaygın seviyedir. Elektronik formatta paylaşılan 2B CAD ve 3B CAD çizimleri arasındaki bir kombinasyondur. Bu CAD standartları BS 1192:2007 tarafından ele alınmaktadır.

Seviye 2: Bu seviye, işbirlikçi formuyla iyi bilinmekte, ancak bu form tek bir paylaşılan modelde çalışmayı gerektirmemektedir. İşbirliği, farklı formatlar arasında bilgi alışverişinde bulunma yeteneğinden gelmektedir. Örneğin bir BIM modeli, İnşaat Operasyonları Bina Bilgi Değişimi (COBie) formatı kullanılarak paylaşılabilen bu geometrinin verileri olan grafiksel olmayan bilgiler ve 3B geometri olan bir grafik bilgisine sahiptir. 2016'da Birleşik Krallık hükümeti, belediyede herhangi bir yeni projenin kabul edilmesini onaylamak için bu çalışma şeklini asgari hedef olarak belirlemiştir.

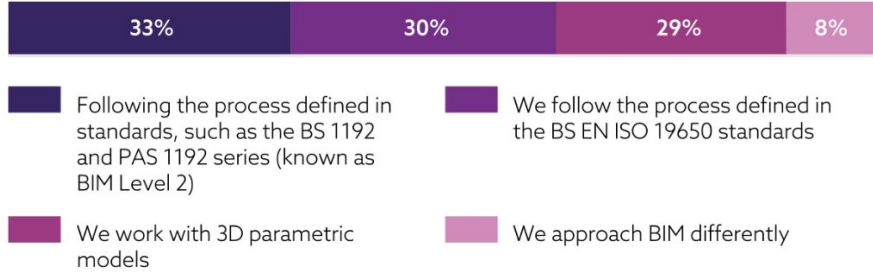
Seviye 3: Bu seviye, tek bir paylaşılan modelde çalışmayı gerektiren tam bir işbirliği formunu tanımlamaktadır.



Şekil 3: BIM Olgunluk Düzeyleri
Kaynak: (British Standards Institution, 2014)

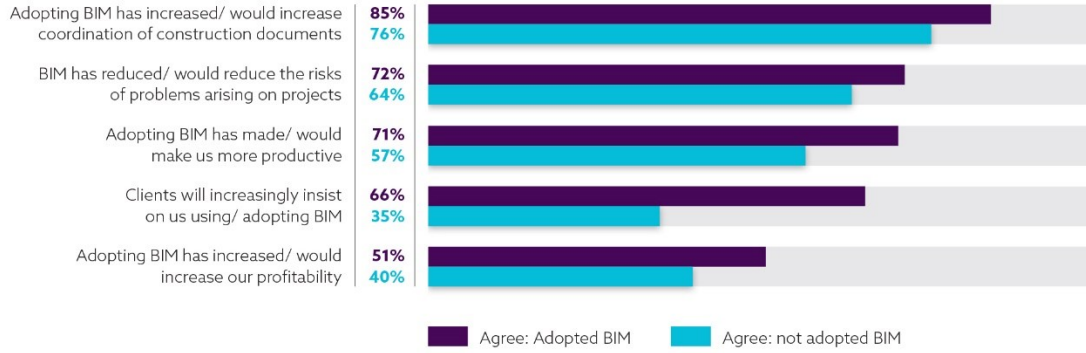
BIM, fiziksel bir binanın tasarımdan daralmaya kadar tüm yaşam döngüsü boyunca ve işletme ve bakım aşaması boyunca dijital bir temsilidir (Borrmann et al., 2018). Son on yılda BIM, bugün bildiğimiz şekliyle metodolojiye dönüşmüştür. BIM, 2013 yılında İngiliz Standartları Enstitüsü (BSI) tarafından bina bilgi modellemesini kullanarak inşaat projelerinin sermaye/teslimat aşaması için bilgi yönetimi için İngiliz standardı PAS 1192-2:2013 Spesifikasyonunu yayınladıktan sonra özellikle kabul edilen bir terim haline gelmiştir. BIM Seviye 2. Daha sonra 2018'de BSI, BIM kullanarak inşa edilmiş bir varlığın tüm yaşam döngüsü boyunca bilgileri yönetmek için BS 1192 ve PAS 1192'yi (BIM Seviye 2) ilk uluslararası BIM standartları ISO 19650 ile değiştirilmiştir.

AEC kuruluşlarının BIM'i nasıl benimsediği ve BIM'e nasıl yaklaştığına ilişkin 2021'deki NBS Dijital İnşaat Raporuna göre, kuruluşların %33'ü BS 1192 ve PAS 1192 standartlarında tanımlanan süreci ve kuruluşların %30'u BS EN ISO 19650 standartlarında tanımlanan süreci takip etmektedir. Ayrıca, danışmanlar ve mimarlık firmaları arasında benimsenme oranı en yüksek, küçük kuruluşların (15'ten az çalışanı) BIM'i benimseme olasılığı daha düşük olarak görülmektedir (NBS Digital Construction Report, 2021; UK BIM Alliance State of the Nation Survey Report, 2021).



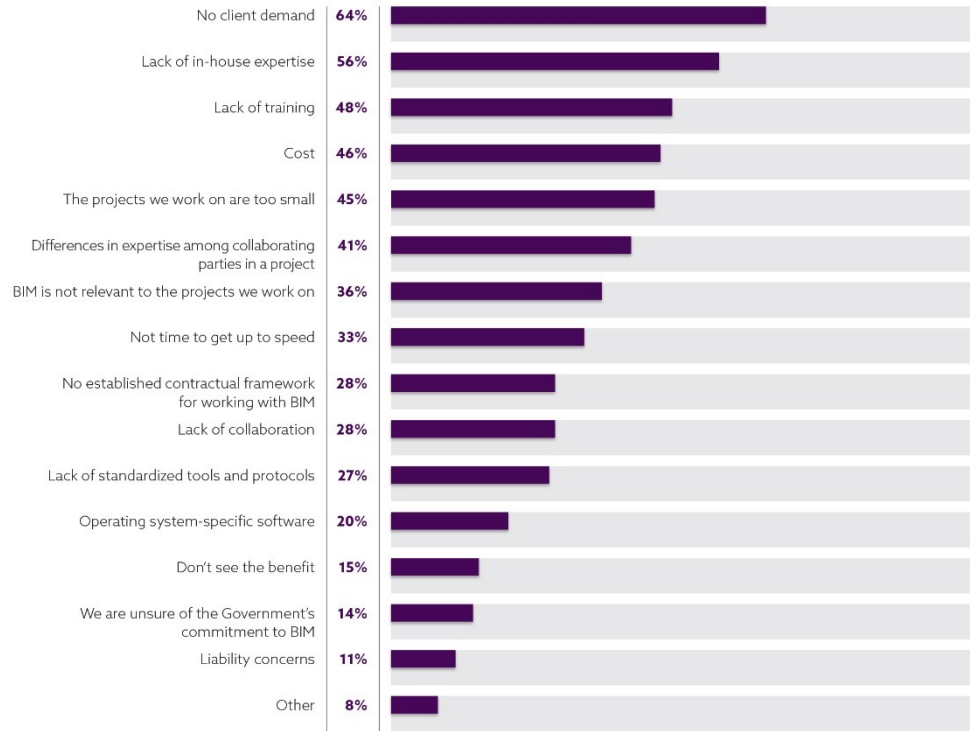
Şekil 4: AEC Kuruluşları Arasında BIM Benimseme ve Uygulama Yaklaşımı
Kaynak: (National Building Specification, 2021)

2020'deki NBS 10. Yıllık BIM Raporuna göre, BIM'in benimsenmesi, inşaat belgelerinin koordinasyonunu artırmada, projelerde ortaya çıkan sorun riskini azaltmada ve verimliliği artırmada en büyük etkiye sahiptir.



Şekil 5: BIM'in Kabulünün Faydaları
Kaynak: (National Building Specification, 2020)

Öte yandan, müşteri talebi eksikliği, kurum içi uzmanlık eksikliği, eğitim ve maliyet, BIM'in benimsenmesinin önündeki başlıca zorluklardandır.



Şekil 6: BIM'in Kabulünün Zorlukları
Kaynak: (National Building Specification, 2020)

2.1.2 Tesis Yönetimi (FM)

Tesis Yönetimi, inşaat aşamasının bitiminden sonra başlar ve bina yaşam döngüsü boyunca en uzun aşamalardan biridir (Hilal vd., 2019; S.-K. Lee vd., 2012).

Tesis Yönetimi için BIM'i kullanmak, bina bilgilerini yönetmek için geleneksel yaklaşımlara kıyasla çeşitli avantajlar sağlamaktadır (Edirisinghe vd., 2017). Tasarım ve inşaat aşamalarından işletme ve bakım aşamasına kadar veri akışını yönetmek için organize bir yapılandırılmış yol sağlamaktadır. Ayrıca bina varlıkları ve sistemleri arasında doğru, bilgi ve niteliklere erişim sağlamaktadır (Pärn vd., 2017).

Daha iyi iş sonuçları elde etmek, bina yaşam döngüsü boyunca tesis işletimini ve yönetimini desteklemeye 6D BIM verilerini dahil etmekten geçmektedir (Parsanezhad, 2015). Bu veriler, ekipmanın teknik özellikleri, bu ekipmanın nasıl kurulacağı, bakım programı, kullanım ömrü ve kullanım kılavuzları hakkındaki tüm bilgileri içermektedir. Bu veriler tasarım aşamasında hazırlanmalı ve inşaat sırasında güncel tutulmalı ve ardından en iyi sonuçları elde etmek için tesis operatörlerine iletilmelidir.

Tesis operatörü tarafından hazırlanan düzenli ve kolay erişilebilir bir veri, bakım ihtiyacını azaltmakta ve binanın ömrü boyunca maliyeti düşürmektedir (Kensek, 2015).

Proje sahipleri genellikle binalarının başlangıç maliyetlerine odaklanmakta, ancak bina inşa edildikten sonra, bina işletim ve bakımının zaman içinde çok daha fazla maliyetli olduğunun farkına varmaktadır (Kelly vd., 2013). Tesis sahipleri, İşletme ve Bakım maliyetlerini azaltmak ve akıllı tesis yönetimini sağlamak için BIM gibi yeni teknolojileri uyarlayarak İşletme ve Bakım (O&M) konusuna daha fazla dikkat etmelidir (Aziz vd., 2016).

2.1.3 İnşaat Operasyonları Bina Bilgi Değişimi (COBie)

İnşaat Operasyonları Bina Bilgi Değişimi (COBie) spesifikasyonu, bilgilerin tasarım aşaması ve inşaat aşaması sırasında nasıl alındığını ve tesis operatörlerine nasıl aktarılabilirliğini göstermektedir. COBie, inşaat aşamasını tamamladıktan sonra büyük miktarda kağıt belgenin tesis operatörlerine aktarılması sürecini ortadan kaldırmaktadır. COBie, tipik olarak, yönetilebilir varlıklar için verileri BIM yazılımından Tesis Yönetimi ve Operasyon ve Bakım yazılımına kolayca aktarılabilen bir veri formatına aktarmak için kullanılan bir değişim formatıdır.

Tasarım aşamasında COBie verileri toplanabilir ve Autodesk Revit gibi tasarım yazılımlarının çizelgelerinde yakalanabilmektedir. Revit gibi BIM yazılımları, dışa aktarırken COBie verilerinin çizimlerle eşleştiğinden emin olmaktadır. Müteahhitler, organize veri yapısı nedeniyle COBie'yi alternatif bir inşaat teslimi yolu olarak görmektedir. COBie'nin en büyük yararlarından biri, MasterFormat UniFormat, Omniclass ve Uniclass gibi Yapı Spesifikasyonları Enstitüleri tarafından sağlanan bir sınıflandırma sistemini kullanarak verileri düzenleme yeteneğidir. COBie, Bilgisayarlı Bakım Yönetim Sistemi (CMMS) yazılımına veya en popüler olan veya bir IFC formatı olan Microsoft Excel elektronik tablo formatına aktarılarak tesis yöneticilerine işlenebilmektedir (Prakash Jawadekar, 2012).

COBie, ekipman spesifikasyon listeleri, garantiler, ürün veri sayfaları, bakım programları ve kullanım ömrü gibi önemli proje verilerini toplamaya yardımcı olmaktadır. Bu bilgiler tesisin işletilmesine ve bakımına yardımcı olmak için çok önemli kabul edilmektedir (Becerik-Gerber vd., 2012a).

COBie'nin en büyük faydalarından biri, 2016'da herhangi bir projeyi sunmak için İngiliz hükümeti tarafından Standart olarak kabul edildikten sonra formatına artan destektir. Ayrıca, Ocak 2019'da, ISO 19650-2 kapsamındaki Birleşik Krallık Ulusal Ekinde, Açık veri formatlarındaki geometrik bilgi alışverişleri COBie formatına göre yapılandırılmalıdır (British Standards Institution, 2019b).

ISO 19650-4:2022'ye göre, bina bilgi modellemesi (BIM) dahil olmak üzere binalar ve inşaat mühendisliği işleri hakkındaki bilgilerin organizasyonu ve sayısallaştırılması — Bina bilgi modellemesini kullanarak bilgi yönetimi — Bölüm 4: Bilgi değişimi); COBie yapısı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (British Standards Institution, 2021):

2.1.3.1 Tasarım

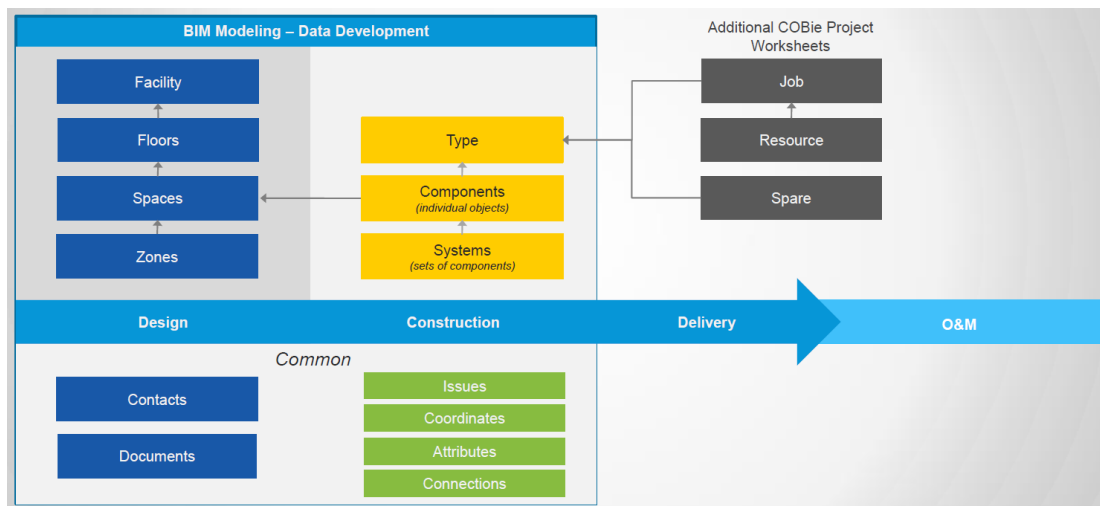
1. **Bileşen:** İşletme aşaması boyunca muayene, bakım, onarım ve değiştirme gibi yönetime ihtiyaç duyabilecek bağımsız organize fiziksel nesnelere ve özellikleri tanımlamaktadır.
2. **Tesis:** Projenin kronolojik detayları ve coğrafi konum kapsamı ile birlikte normal olarak altyapının veya binanın bir bölümünde inşa edilmiş bir coğrafi faydayı veya farklı operasyonel yapıları tanımlamaktadır.
3. **Kat (bölge):** Ayrılmış yatay bölgeler, dikey seviyeler ve tahsis edilmiş boşluklarla alt bölümler içeren belirli bir boşluk bölümünü tanımlamaktadır.
4. **Alan (konum):** Boş alanların dahil, ancak mutlaka izole edilmiş alanlar dahil olmadığı dolu alan, hizmet alanı ve bakım altı alan gibi alan türünü tanımlamaktadır.
5. **Sistem:** Kurumsal bir işlev sağlamak için yönetilebilen ve düzenlenebilen Bileşenler kümesini tanımlamaktadır.
6. **Tip:** Malzemeler, kalemler ve ürünler gibi Bileşen özelliklerini tanımlamaktadır.
7. **Bölge:** Durum, aktivite, giriş ve yönetim gibi belirli bir ortak Niteliği olan bir Alan grubunu tanımlamaktadır.

2.1.3.2 Ortak

1. **Nitelik:** Bir varlığa ilişkin belirli bir özelliği tanımlamaktadır.
2. **Bağlantı:** İki bileşen arasında ortak bir ilişkiyi tanımlamaktadır.
3. **İrtibat:** Bir Tesisin yaşam döngüsünden sorumlu olan bir kişi veya birliği tanımlamaktadır.
4. **Koordinat:** Bileşen, Mekan, Kat veya Tesis ile ilgili bir konum tanımlamaktadır.
5. **Belge:** Bir varlığa ilişkin harici bir belgeyi tanımlamaktadır.
6. **Sorun:** Varlıklarla ilgili bilgi veya tehlike gölünü tanımlamaktadır.

2.1.3.3 Yapı

1. **İş:** Operasyon aşaması boyunca Tip ile ilgili bir görevi tanımlamaktadır.
2. **Kaynak:** Bir İş gerçekleştirmek için gerekli olan bir yeteneği veya materyali tanımlamaktadır.
3. **Yedek:** Bir Tip ile ilgili olan ve başka bir parça ile değiştirilebilen bir parçayı tanımlamaktadır.

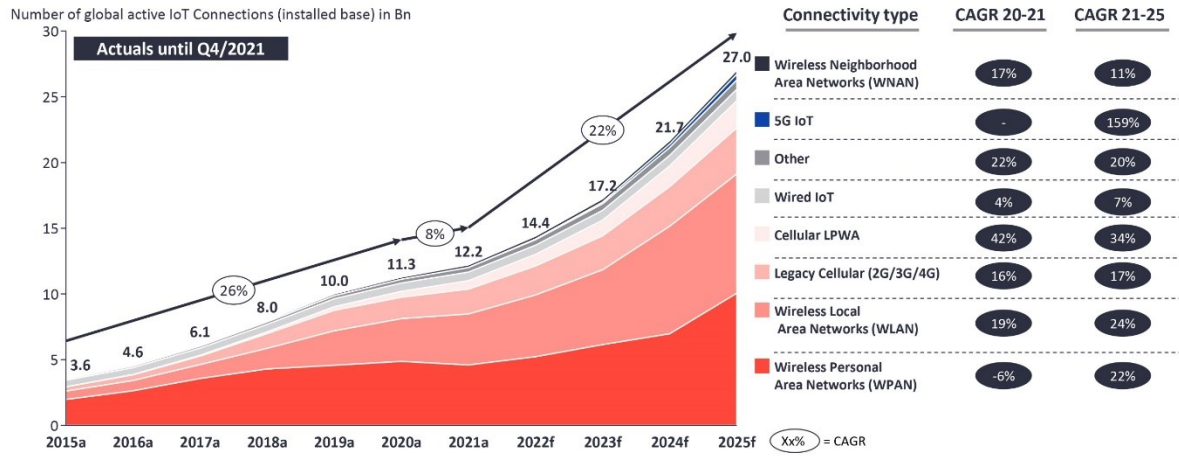


Şekil 7: COBie Yapısı
Kaynak: Autodesk

2.1.4 Nesnelerin İnterneti (IoT)

Nesnelerin İnterneti (IoT), veri alışverişi yapmak ve internet üzerinden diğer sistem ve cihazlarla bağlantı kurmak amacıyla sensörler, işleme yeteneği, yazılım ve diğer teknolojilerle entegre edilmiş fiziksel nesnelerin (nesnelerin) ağını tanımlamaktadır. Bulut platformlarının kullanılabilirliğindeki artış ve düşük maliyetli sensör teknolojisi nedeniyle IoT'nin benimsenmesi önemli ölçüde arttırmaktadır.

State of IoT Spring 2022 raporuna göre, küresel bağlantılı IoT cihazlarının sayısı 2021 milyarda 12,2 ve 2025 yılına kadar yirmi yedi milyar bağlı IoT cihazına yükselmesi beklenmektedir.



Şekil 8: 2015'ten 2025'e kadar küresel olarak bağlı IoT cihazlarının sayısı
Kaynak: (IoT Analytics, 2022)

2021'deki Microsoft IoT Signals Report Edition 3'e göre, IoT'nin benimsenmesi, artan operasyon verimliliği, iyileştirilmiş güvenlik koşulları ve artan çalışan verimliliği üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Efficiency	Increases the efficiency of operations	55%
Safety	Improves safety conditions	51%
Efficiency	Allows employees to be more productive	50%
Unplanned Downtime	Allows for better optimization of tools/equipment	49%
Quality	Reduces chance for human error	49%
Quality	Increases customer satisfaction	48%
Yield	Increases production capacity	48%
Efficiency	Helps me be better informed and make better business decisions	47%
Quality	Increases my organization's competitive advantage	47%
Yield	Provides my business with cost savings	45%
Unplanned Downtime	Improves the traceability of goods	44%
Yield	Reduces business expenses	43%
Regulatory Compliance	Helps to ensure compliance	43%
Yield	Increases revenue	42%
Yield	Enables new types of customer offerings	41%
Yield	Enables new revenue streams	38%

Şekil 9: IoT Kabulünün Faydaları
Kaynak: (Microsoft, 2021)

Buna ek olarak, kuruluşlar hala mevcut çözümleri uygulamaktadır, IoT'yi şu anda kullandıklarından daha fazla kullanmalarını engellemektedir, siber güvenlik ve teknik karmaşıklık nedeniyle uygulamada zorluk, IoT'nin benimsenmesinin karşı karşıya olduğu ana zorluklardır.

Still in Progress	Still implementing our current solutions	30%
Security	Security risk isn't worth it	29%
Complexity/Technical	Want to work out existing/future challenges before adding/using IoT more	29%
Complexity/Technical	Too complex to implement because of technology demands	28%
Complexity/Technical	Too complex to implement because of business transformation needed	27%
Lack of Budget/Staff	Don't have human resources to implement & manage	26%
Lack of Budget/Staff	Don't have budget	26%
Security	Concerned about consumer privacy	26%
Complexity/Technical	Too long to implement	25%
Compliance	Too many compliance/regulatory challenges	25%
Lack of Knowledge	Lack technical knowledge	24%
Lack of Knowledge	Not enough training/guidance on how to deploy	23%
Lack of Knowledge	Don't know enough	22%
Leadership/Team Challenges	No buy-in from senior leadership	22%
Security	Unwilling to store data in public cloud	21%
Haven't Found Right Solution	No solution that meets our needs	20%

Şekil 10: IoT Kabulünün Zorlukları
Kaynak: (Microsoft, 2021)

2.1.5 Bulut Bilişim

Bulut Bilişim, internet üzerinden depolama, veritabanları, sunucular, ağ iletişimi, yazılım, analitik ve bilgi işlem gücünü içeren bilgi işlem hizmetlerinin sağlanmasıdır (Mell & Grance, 2011).

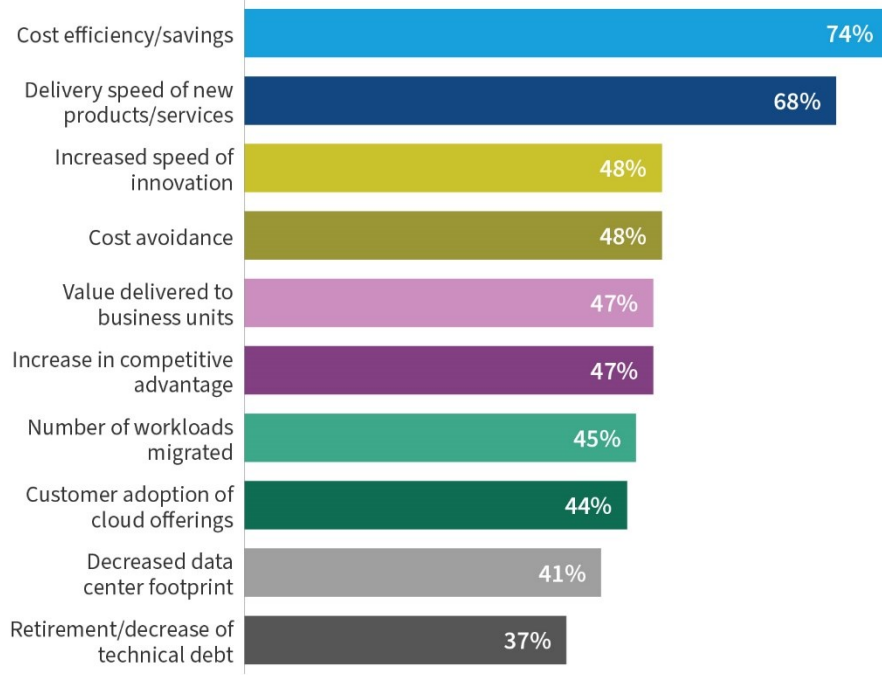
Dağıtım modeline göre üç tür bulut bilişim vardır:

- **Özel bulut:** Tek bir kuruluş tarafından sahip olunan ve işletilen bulut olarak tanımlanmaktadır ve bulutun altyapısı bulut sağlayıcısı tarafından korunmaktadır.
- **Genel bulut:** Microsoft Azure ve Amazon Web Services (AWS) gibi bir üçüncü tarafça sahip olunan ve işletilen bulut olarak tanımlanmaktadır, bulutun altyapısı özel bir ağ üzerinde korunmaktadır.
- **Hibrit bulut:** Hibrit bulutlar, uygulamaların ve verilerin aralarında paylaşılmasına izin veren özel ve genel bulutları birleştirmektedir.

Hizmet modeline göre üç tür bulut vardır:

- **Hizmet olarak altyapı (IaaS):** Tüketicinin sunucu depolaması, ağlar ve işletim sistemleri gibi bulut altyapısını bulut sağlayıcısından kiraladığı bulut bilişim hizmetlerini ifade etmektedir.
- **Hizmet olarak platform (PaaS):** Bulut satıcılarının, geliştiricilere altyapı oluşturma ve bakımını yapma karmaşıklığı olmadan uygulamalar oluşturmaları için eksiksiz bir dağıtım ortamı sağladığı bulut bilişim hizmetlerini ifade etmektedir.
- **Hizmet olarak yazılım (SaaS):** Bulut satıcılarının ana bilgisayara sağladığı ve tüketicinin yazılım uygulamalarını İnternet üzerinden sunduğu bulut bilişim hizmetlerine atıfta bulunmaktadır.

Flexera 2022 Bulutun Durumu Raporuna göre, bulut bilişimin benimsenmesi, maliyet verimliliğini/tasarruflarını ve yeni ürün/hizmetlerin dağıtım hızını iyileştirmede en büyük etkiye sahiptir.



Şekil 11: Bulut Benimseme
Kaynak: (Flexera, 2022)

Ek olarak, güvenlik ve çok sayıda kaynak ve uzmanlık, bulut bilişimin benimsenmesinin karşı karşıya olduğu ana zorluklardandır.

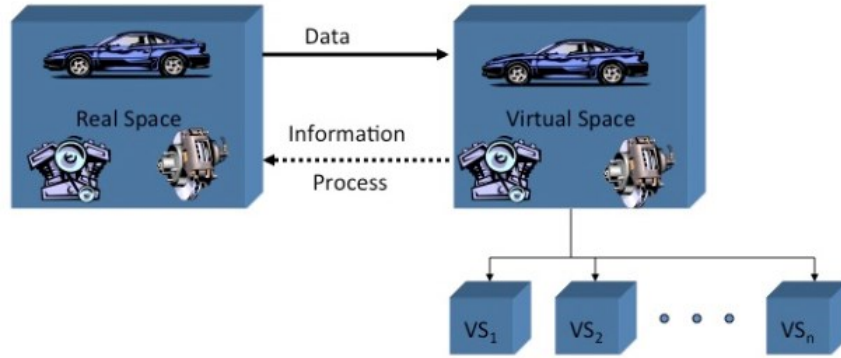


Şekil 12: Bulutu Benimseme
Kaynak: (Flexera, 2022)

2.1.6 Dijital İkiz (DT)

2.1.6.1 Dijital İkizin Kökenleri

İlk dijital ikiz konsepti Michael Grieves tarafından 2002 yılında Michigan Üniversitesi Üretim Mühendisleri Topluluğu konferansındaki sunumu sırasında tanıtılmıştır. Michael Grieves, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) için kullanılan modeli temel olarak dijital ikiz konseptini önermiştir. PLM modeli sanal alan, gerçek alan ve iki alan arasındaki bilgi için bağlantı iş akışı olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Bu kavram Bilgi Yansıtma Modeli olarak adlandırılmıştır (Grieves, 2006).



Şekil 13: Michael Grieves tarafından PLM için kavramsal ideal
Kaynak: (Grieves, 2006)

Dijital ikiz kavramı, 2010 yılına kadar birkaç farklı isme sahip olmuştur ve sonunda NASA tarafından 2010 teknoloji alanı 20 yol haritası raporunda dijital ikiz olarak adlandırılmıştır (Piascik vd., 2010).

Ancak ilk dijital ikiz, 1960'larda Apollo 13 görevi için NASA tarafından yapılmıştır. Dijital model, Apollo 13'ün kurtarma ve başarısızlık senaryolarını içeren görevi için astronotları eğitmek için kullanılan 15 simülatörden oluşmaktadır. 1970'deki asıl görev sırasında Apollo 13'ün oksijen deposu aya giderken patlamış ve acilen dünyaya geri dönmek zorunda kalmıştır. Bu dijital ikiz model, Apollo 13'ün üç astronotunun güvenli bir şekilde dünyaya getirilmesine yardımcı olmuştur.

2.1.6.2 İkizler Prensipleri

İkizler İlkeleri, Ulusal Dijital İkizin (NDT) geliştirilmesine yardımcı olan ve yapıli çevrede etkin bilgi yönetimi çerçevesini sağlayan dokuz yol gösterici değerden

oluşmaktadır (Centre for Digital Built Britain, 2018). İlkeler Amaç, Güven ve İşlev olmak üzere üç ana kategoride düzenlenmiştir.

Purpose: Must have clear purpose	Public good Must be used to deliver genuine public benefit in perpetuity	Value creation Must enable value creation and performance improvement	Insight Must provide determinable insight into the built environment
Trust: Must be trustworthy	Security Must enable security and be secure itself	Openness Must be as open as possible	Quality Must be built on data of an appropriate quality
Function: Must function effectively	Federation Must be based on a standard connected environment	Curation Must have clear ownership, governance and regulation	Evolution Must be able to adapt as technology and society evolve

Şekil 14: İkizler Prensipleri
Kaynak: (Centre for Digital Built Britain, 2018)

İkizler İlkeleri, dijital ikizi “varlıkların, süreçlerin veya sistemlerin yapıları veya doğal ortamdaki gerçekçi dijital temsili” olarak tanımlanmaktadır (Centre for Digital Built Britain, 2018). Dijital ikizi diğer herhangi bir dijital modelden farklı kılan şey, dijital ikizin fiziksel modele bağlı dinamik bir model olması olarak belirtilmektedir, buna fiziksel bir bina hakkında gerçek zamanlı veri toplayan sensörler gibi canlı veriler örnek olarak verilmektedir.

Dijital ikiz, sunulan fiziksel gerçeklik için aşağıdakilere bağlı olarak bir doğruluk düzeyine sahip olmalıdır:

- **Veri:** Dijital ikizin dayandığı verilerin kalitesi,
- **Model:** Dijital modelin kalbini temsil eden kodların ve algoritmaların kalitesi,
- **Görselleştirme:** Çıktıların sunulmasının kalitesi.

2.1.6.3 Dijital İkizler Ekosistemi

AI, IoT, VR, AR ve bulut bilişim gibi 4. endüstri devrimi teknolojileri, tüm endüstriler için dijital dönüşüme öncülük etmektedir. Sonuç olarak, bu dijital dönüşüm, Dijital İkizler gibi yeni terimler ve Planla-Yap-İşlet-Entegre Et (PBO-I) yaşam döngüsü gibi yeni kavramlar yaratmaktadır. AEC endüstrisinde bu dijital dönüşümü uygulamak,

ticari, ekonomik, sosyal ve çevresel değerlerin kilidini açma potansiyeli sunmaktadır. Ancak, AEC endüstrisindeki dijital dönüşüm uygulaması iyi bir şekilde ele alınmamıştır ve uygulama boşlukları olduğu görülmektedir.

2020'de building SMART International (BSI), AEC endüstrisindeki ticari, ekonomik, sosyal ve çevresel değerleri ortaya çıkarmak için net bir strateji belirlemek amacıyla Building SMART Dijital İkizler Çalışma Grubu (DTWG) kurulmuştur.

Bu grup, AEC endüstrisi için bir dijital ikiz ekosistemi geliştirmeye yönelik bir vizyon ve misyon sunmak üzere "Dijital İkizlerin Ekosistemini Etkinleştirme" başlıklı bir makale geliştirmiştir.

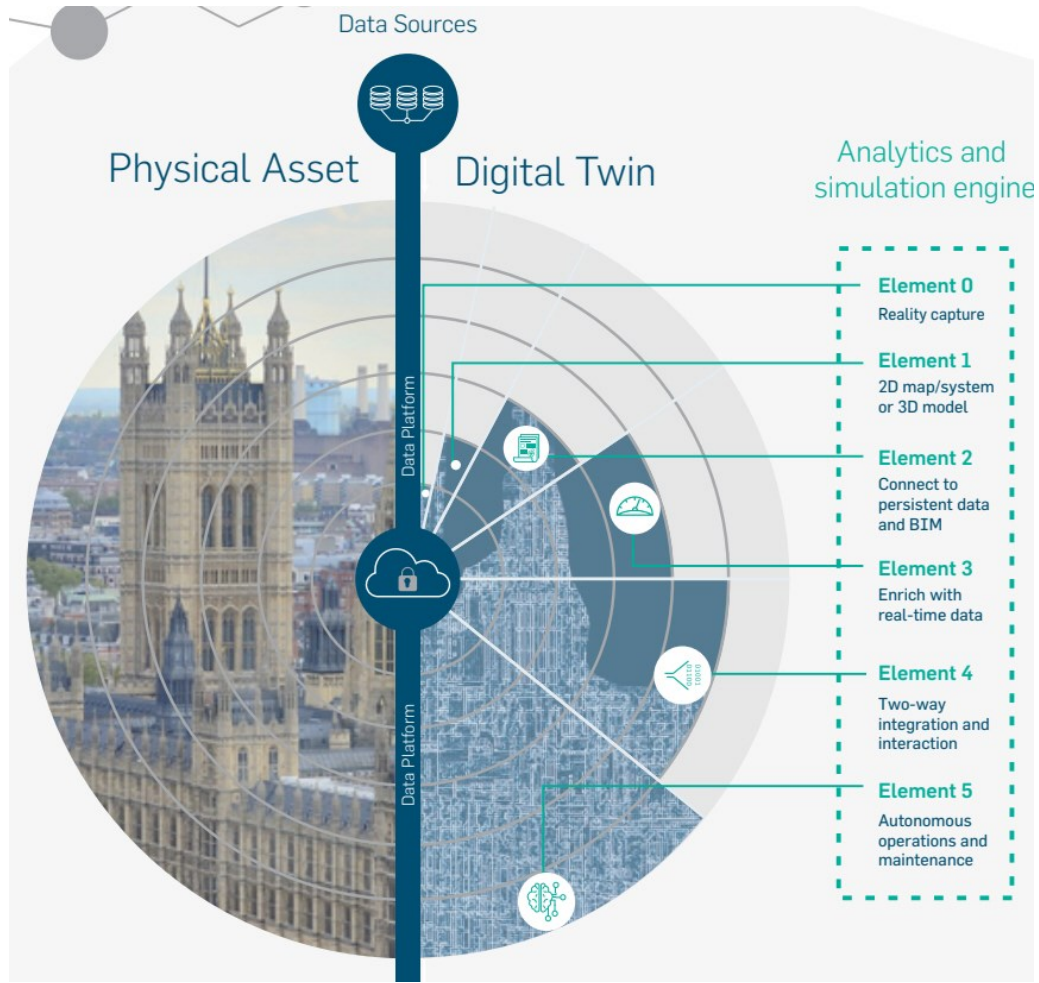
Kağıt dijital ikizi "Dijital ikiz (DT) - aynı zamanda dijital gölge, dijital kopya veya dijital ayna olarak da adlandırılır - fiziksel bir varlığın dijital bir temsilidir. Birbiriyle bağlantılı olan fiziksel ve dijital ikiz, PBOD yaşam döngüsü ve kullanım aşaması boyunca düzenli olarak veri alışverişinde bulunur. Yapay zeka, makine öğrenimi, sensörler ve IoT gibi teknolojiler, dinamik veri toplamaya ve doğru zamanda veri alışverişinin gerçekleşmesine izin verir." şeklinde tanımlanmıştır (buildingSMART International, 2020).

BSI tarafından, standardizasyon ve AEC endüstrisindeki uygulama boşlukları ile yakından ilgili üç odak alanı belirlenmiştir:

- Veri modelleri için standartlar: Bu standartlar, kentsel planlama için coğrafi bilgiden inşaat için dijital mühendislik modellerine ve hatta varlık performansı için operasyonel veri modellerine kadar çeşitli ölçek seviyelerinde çalışabilen veri modelleri ve birlikte çalışabilir sistem verilerinden oluşmaktadır.
- Veri yönetimi ve entegrasyonu için standartlar: Bu standartlar, veri bilimi ve bilgi yönetimi gibi birbiriyle ilişkili iki alan arasındaki veri yönetimini ve entegrasyonu tek tip hale getirmeyi amaçlamaktadır.
- Veri güvenliği ve gizliliği: Bu verilerin ölçek düzeyleri, yaşam döngüsü aşamaları, projeler ve araçlar arasında zahmetsizce akmasına olanak tanıyan veri güvenliği ve gizlilik standartlarını geliştirmektir.

2.1.6.4 Dijital İkiz Olgunluk Ögeleri

Mühendislik ve Teknoloji Enstitüsü (IET) ve Atkins. Tablo 1’de gösterildiği gibi özellikle AEC endüstrisi için tasarlanmış bir Dijital İkiz olgunluk modeli geliştirmiştir. Altı öğede düzenlenen Dijital İkiz Olgunluk Düzeyleri, daha yüksek dereceli öğeler maliyeti ve karmaşıklığı artırmaktadır. Bununla birlikte, bu öğeler sıralı veya doğrusal değildir, bu nedenle Dijital İkiz, alt sıradaki öğelere sahip olmadan önce daha yüksek sıralı öğelerin özelliklerine sahip olabilmektedir (Institution of Engineering and Technology (IET), 2019).



Şekil 15: Yapılı çevre için Dijital İkiz Olgunluk Ögesi
Kaynak: (Institution of Engineering and Technology (IET), 2019).

Olgunluk ögesi (logaritmik ölçek)	Tanımlama prensibi	Anahat kullanımı
0	Gerçeklik yakalama (örneğin nokta bulutu, insansız hava araçları, fotogrametri veya çizimler/eskizler)	Brownfield (mevcut) yerleşik anket
1	2B harita/sistem veya 3B model (örneğin, meta veri veya BIM içermeyen nesne tabanlı)	Tasarım/varlık optimizasyonu ve koordinasyonu
2	Modeli kalıcı (statik) verilere, meta verilere ve BIM Aşama 2'ye (örneğin belgeler, çizimler, varlık yönetim sistemleri) bağlayın	5B/5B simülasyonu, Tasarım/varlık yönetimi, BIM Aşama 2
3	Gerçek zamanlı verilerle zenginleştirin (ör. IoT, sensörler)	Operasyonel verimlilik
4	İki yönlü veri entegrasyonu ve etkileşimi	Uzaktan ve sürükleyici operasyonlar, Fiziksel olanı dijitalden kontrol edin
5	Otonom operasyonlar ve bakım	Tam gözetim ve şeffaflık ile eksiksiz öz yönetim

Tablo 1: Yapılı çevre için Dijital İkiz Olgunluk Ögesi

Element 0: Bu seviyenin amacı, mevcut bina için mevcut geometriyi veya tasarımı yansıtan son model oluşturmaktır. As-built modeli, çizimler, eskizler, fotogrametri, insansız hava araçları ve lazer tarayıcılar gibi çeşitli anket ve gerçeklik yakalama teknikleri kullanılarak oluşturulmaktadır. Element 0'ın veri tipi nokta bulutları olarak kabul edilmektedir.

Eleman 1: Bu seviyenin amacı, Eleman 0'ı nesne tabanlı 2B harita/sistemlere veya 3B modele dönüştürerek tasarım koordinasyonu ve optimizasyonu yoluyla önemli bir değer sağlamaktır. Öge 1'in veri türü, meta verisi veya BIM bilgi verisi olmayan geometri olarak kabul edilmektedir (şekiller, yüzey).

Öge 2: Bu seviyenin amacı, karmaşık AEC verilerini koordine etmek için verimli bir ortam yaratmak için tek bir birlikte çalışabilir veri seti ile BIM kullanan yapıli çevreye adaptasyon PLM'si olan bir Yapı yaşam Döngüsü Yönetimi (BLM) oluşturmaktır. Veri türü, kaydedildikten sonra değişmeyen ve bina bilgilerini otomatik olarak güncelleyemeyen, yapıli çevre için statik veriler olarak kabul edilmektedir.

Element 3: Bu, gerçek bir Dijital İkiz'in başlangıç noktasının seviyesidir. Bu seviyede, fiziksel binadan dijital varlığa tek yönlü akış yoluyla sensörlerden ve IoT cihazlarından

gerçek zamanlı olarak dinamik veriler elde edilmektedir. Toplanan veriler, tesis yöneticileri tarafından karar vermede onları değerlendirmek için saklanabilmekte ve analiz edilebilmektedir.

Öge 4: Bu seviyede, fiziksel varlık ve dijital varlık arasında iki entegrasyon yolu kurulmaktadır; örneğin operatör, fiziksel varlıkta bulunan bir cihazı dijital varlıktan açıp kapatabilmektedir. Bu entegrasyon düzeyi, fiziksel varlıkta ek sensörler gerektirmektedir.

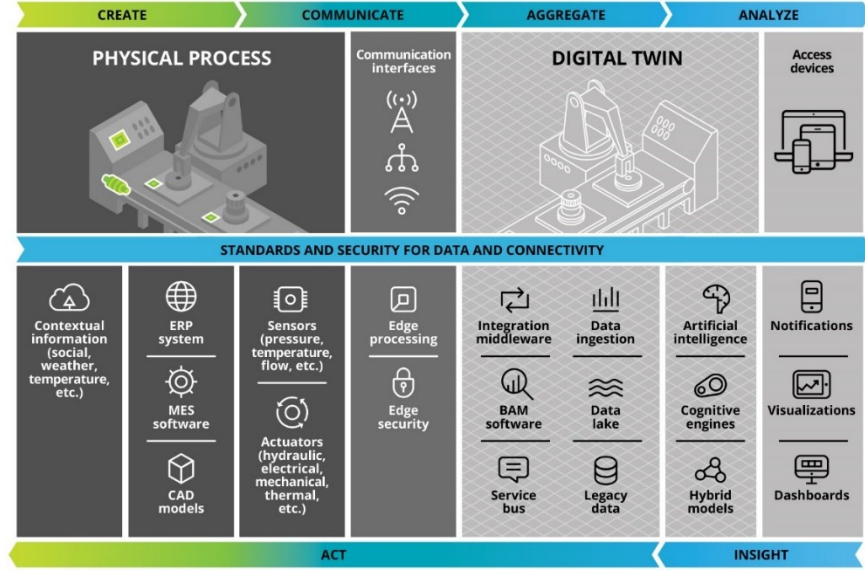
Öge 5: Bu, yapay zekâ ve makine öğrenimi kullanarak dijital ikizin özerk operasyonlarını ve bakımını başlatma düzeyidir. Bu seviyede dijital ikiz öğrenmekte, veriye dayalı kararlar vermekte ve çok az insan etkileşimi ile veya hiç etkileşim olmadan görevleri özerk bir şekilde tamamlamaktadır.

2.1.6.5 Dijital İkiz Mimarisi

Dijital ikiz, IoT, Bulut Bilişim, Uç Bilgi İşlem, Büyük Veri, Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi gibi teknolojilerin bir araya gelmesiyle sağlanan mimari bir kavramdır (Parrott & Warshaw, 2017). Altı adımdan oluşan bir dijital ikiz oluşturmak için önerilen kavramsal mimari aşağıda sıralanmıştır:

1. **Oluşturma:** Bu adım, fiziksel varlığın, fiziksel varlıktan önemli girdileri ölçen sensörlerle bağlantılandırılmasını ve analizi için girdi olarak kullanılacak verilerin sürekli olarak güncellenmesini içermektedir. Sensörler tarafından toplanan ölçüm, operasyonel ölçümler ve çevresel veriler olarak kategorize edilebilmektedir.
2. **İletişim:** Bu adım, fiziksel varlık ile IoT sensörlerini kullanan dijital platform arasında sorunsuz bir gerçek zamanlı entegrasyon sağlamaktadır.
3. **Toplama:** Bu adım, toplanan verileri veritabanına aktararak, işleyerek ve analitik için hazırlayarak veri alımını desteklemektedir.
4. **Analiz Etme:** Bu adımda veriler, yinelemeli modeller geliştirmek ve karar vermede kullanılacak içgörüler oluşturmak için gelişmiş analitik araçları kullanılarak analiz edilmekte ve görselleştirilmektedir.
5. **İçgörü:** Bu adımda veriler, analitik içgörüler ve olası araştırma ve eylemler gerektiren alanları vurgulayan panolar kullanılarak görselleştirilmektedir.

6. **Eylem:** Bu adımda, dijital ikizin etkisini elde etmek için eyleme dönüştürülebilir içgörüler fiziksel varlığa ve dijital varlığa geri gönderilebilmekte ve kapalı süreci tamamlamaktadır.



Şekil 16: Dijital İkiz Kavramsal Mimari
Kaynak: (Parrott & Warshaw, 2017)

2.2 BIM'den Dijital İkize

2.2.1 BIM Tabanlı FM

İkinci alt bölüm, mevcut bilgileri keşfetmek, eğilimleri, yöntemleri ve boşlukları tespit etmek için ilgili alanlarda, önceki çalışmaların ve projelerin gözden geçirilmesini kapsamaktadır.

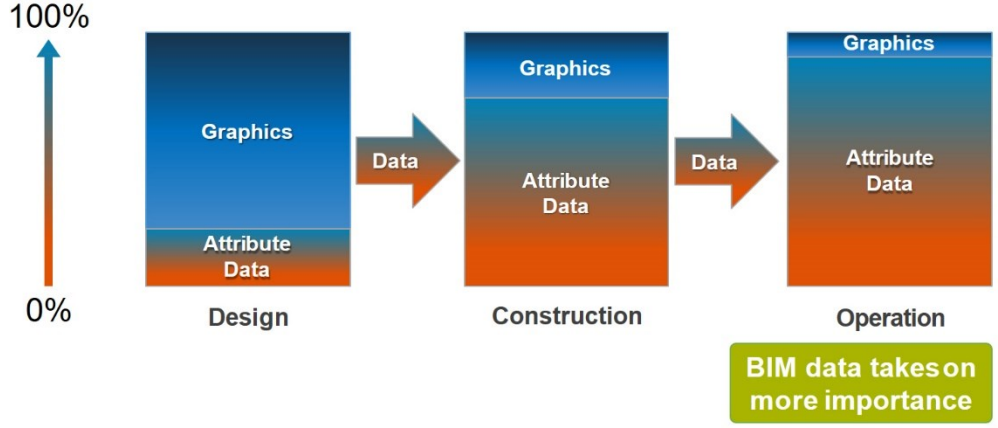
Bu incelemede kullanılan ana bilgi kaynakları ve olası ilgili makaleler, Google Scholar, ScienceDirect, Springer, MDPI ve ASCE Kütüphanesi aracılığıyla arama yapılarak seçilmiştir ve yayınlanma yılı 2012 ile 2022 arasında olan çalışmalar ele alınmıştır. Arama motorunda kullanılan anahtar kelimeler BIM, IoT, Bulut, Dijital İkiz ve Tesis Yönetimi kavramlarıdır.

Bu çalışma üç sınıflandırma düzeyinde geliştirilmiştir:

- BIM ve FM
- BIM, FM ve IoT
- BIM, FM, IoT ve Bulut

2.2.1.1 Uygulamalar ve Zorluklar

BIM grafik bilgilerinin ve verilerinin miktarı, tesis yaşam döngüsü boyunca aşamadan aşamaya değişmektedir. Tasarım aşamasında, grafiksel bilgi esastır ve önceliği almaktadır; daha sonra inşaat aşaması başladığında önceliği azalmaya başlamaktadır. İnşaat ve işletme aşamalarında öznitelik verileri artmaya başlamakta ve öncelik kazanmaktadır. Bir bina faaliyete geçtiğinde BIM'deki verilerin önemi artmakta buna sebep olarak da bina sahiplerinin grafikten çok BIM verilerine ihtiyaç duyduğu belirtilmektedir (Carbonari vd., 2015; T. X. Liu, 2017).



Şekil 17: Tesis Yaşam Döngüsü Üzerinden BIM Grafik Bilgileri ve Nitelik Verilerinin Önemi
Kaynak: (P. M. Teicholz & IFMA Foundation., 2013)

Bu seviyenin uygulanması, proje geliştirme aşamaları boyunca FM destekli BIM verilerinin toplanması için pratik ve etkili bir çerçeve sağlamayı amaçlamaktadır (P. . Teicholz & IFMA Foundation., 2013). Ancak, proje yaşam döngüsü boyunca verilerin kim tarafından ve ne zaman sağlanması gerektiğini belirlemek ve BIM özellikli FM için veri gereksinimlerini tanımlamak gibi BIM özellikli FM için zorluklar bulunmaktadır (Becerik-Gerber vd., 2012b). BIM ekipleri, çeşitli FM bilgi formatları nedeniyle bilgi yönetimi ile de mücadele etmektedir (Eastman vd., 2018). Bu verilerin Industry Foundation Classes (IFC) ve Construction Operations Building Information Exchange (COBie) gibi iyi yapılandırılmış bir formatta organize edilmesi, birlikte çalışabilirlikle ilgili sorunların çözülmesine yardımcı olmakta ve tesisin başlangıcından itibaren tüm yaşam döngüsü içinde tesis yöneticilerinin ihtiyaç duyduğu varlık verilerini ve bilgilerini sunmaktadır. Organize prosedürler aracılığıyla doğru bir şekilde veri toplamak için bir proje geliştirilmektedir (Lavy vd., 2019).

2.2.1.2 Operasyon ve Bakım (O&M)

İşletme ve Bakım (O&M) yönetiminde BIM tabanlı FM uygulamalarına yönelik araştırmalar, tüm bakım yönetimi sürecini verimli bir şekilde izlemek ve kontrol etmek için BIM ve FM sistemlerinin bilgilerini farklı teknolojiler kullanarak entegre etmeye odaklanmaktadır.

BIM modeli, İşletme ve Bakım aşamasında FM için veri tabanı görevi görebilmektedir, tesis işletim aşamasında bakım personeli kayıtları için BIM tabanlı bir FM sistemi önerilmiştir (Lin & Su, 2013).

BIM modeli, FM ve Bilgisayarlı Bakım Yönetim Bilgi Sistemi (CMMS) arasında veri alışverişi ve entegrasyonu sağlamakta, ekipman arızalarını CMMS kullanarak ilgili bakım bilgilerine bağlamak için düzeltici bakım verilerini BIM'e entegre eden optimize edilmiş bir FM veri toplama iş akışını devretmektedir (Shalabi & Turkan, 2017).

Ayrıca, BIM tabanlı İşletme ve Bakım sistemleri, ekipman Arıza tespiti ve teşhisinde (FDD) kullanılabilir (Motawa & Almarshad, 2013). Önleyici bakım kararlarını desteklemek için bina bakım operasyonları hakkında bilgi toplayan BIM tabanlı bir FM karar destek sistemi geliştirilmiştir.

2.2.1.3 Acil Durum ve Güvenlik Yönetimi

Acil durum ve güvenlik yönetiminde BIM tabanlı FM uygulamalarına yönelik araştırmalar, BIM verilerine dayalı olarak gerçekleştirilen acil durum simülasyonu ve tahliyesine odaklanmaktadır.

FM için güvenlik bilgileri BIM modelinde düzenlenebilmektedir (Wetzel & Thabet, 2016). Yapılandırılmış, göreve özel ve ilgili güvenlik bilgileri FM personeline yol bulma ve acil tahliye durumunda büyük bir sorun oluşturmaktadır (Kim & Lee, 2019). 5B BIM'de birden fazla inşaat ekibi için şantiyedeki tüm olası tahliye yollarını otomatik olarak analiz etmek, oluşturmak ve görselleştirmek için BIM tabanlı bir FM çerçevesi önermiştir.

Binalar için en yaygın acil durum yangın olarak belirtilmektedir. (Wang vd., 2015). Binaların yangın güvenliği yönetimini desteklemek için dört modül önerilmiştir. Bunlar ekipman bakımı, güvenlik eğitimi, tahliye değerlendirmesi ve kaçış yolu planlamasından oluşan BIM tabanlı bir FM sistemi olarak belirtilmektedir.

2.2.1.4 Enerji Yönetimi

Enerji yönetiminde BIM tabanlı FM uygulamalarına yönelik araştırmalar, İşletme ve Bakım aşamasında tesislerin enerji performansının izlenmesine ve kontrol edilmesine odaklanmaktadır.

Enerji yönetiminde BIM uygulaması, FM karar vermede kullanılabilir (Lee vd., 2016). Enerji yönetimi için tesis yöneticisinin bina ekipmanını kontrol etmesini ve bina enerji tüketimini izlemesini destekleyebilecek bir BIM tabanlı optimizasyon operasyon tekniği geliştirmek mümkündür.

BIM, farklı enerji yönetim sistemlerinden gelen FM verilerini bütünleştirmek için umut verici bir araç olarak düşünölmektedir (Oti vd., 2016'a). Bina enerji tüketiminden geri bildirim döngülerini kullanarak bina tasarımını ve tesis yönetimini iyileştirmek için Bina Yönetim Sistemi (BMS) verilerini bir BIM ortamında entegre etmek için bir çerçeve önerilmiştir.

Enerji tüketimi BIM modelinde gösterilebilmektedir, (Francisco vd., 2018). 2 ve 3 Boyutlu görünömlerde enerji tüketimi değerlerinin karşılaştırılmasını sağlayan ve bu değerler arasında karşılaştırma sağlayan bir Revit API'si ve bir as-built BIM modelinde farklı bir renk kullanarak enerji tüketimi görselleştirmesi geliştirilmiştir.

2.2.1.5 Özet

Önceki çalışmalar, FM'deki BIM uygulamasının kapsamlı bir incelemesi sunulmuş ve bilgi boşlukları tespit edilmiştir. BIM'in FM'de başarılı bir şekilde uygulanması şunları gerektirmektedir: BIM özellikli FM için veri gereksinimlerini tanımlamak, bu verileri iyi yapılandırılmış biçimde düzenlemek ve çeşitli BIM ve FM sistemleri arasında sorunsuz bilgi alışverişi iş akışı sağlamak. Bilgiler sorunsuz bir şekilde değiş tokuş edildiğinde, BIM tesis faaliyetlerini iyileştirmek, güvenlik yönetiminin verimliliğini artırmak, İşletme ve Bakım aşamasında tesisin enerji performansını izlemek ve kontrol etmek ve desteklemek için yeni işlevler sağlamaktadır. Tesis yöneticileri, karar verme ve bununla birlikte, FM'deki BIM uygulaması, veri alışverişi formatı ve bilgi yönetim

sistemi ve bilgi FM veri gereksinimi eksikliği nedeniyle hala zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır.

2.2.2 BIM-IoT Yabanlı FM

2.2.2.1 Uygulamalar ve Zorluklar

Bu seviyenin uygulanması, IoT sensörlerinden toplanan gerçek zamanlı çevresel veriler boyunca FM özellikli BIM verilerinin toplanması için pratik ve etkili bir çerçeve sağlamayı amaçlamaktadır. IoT cihazlarından gelen gerçek zamanlı verilerle BIM entegrasyonu, akıllı FM'yi mümkün kılmakta ve binaların tüm yaşam döngüsü boyunca inşaat ve operasyonel verimliliği artırmaktadır (Dahanayake & Sumanarathna, 2021). IoT, dinamik ve gerçek zamanlı veri toplama yoluyla FM etkinliklerinin verimliliğini artırmaktadır (Yang vd., 2013). IoT sensörleri tarafından toplanan canlı çevresel verileri BIM, Revit ve Dynamo kullanan model ve Artırılmış Gerçeklik (AR) uygulamasında görselleştiren bir platform geliştirmiştir (Natephra & Motamedi, 2019).

IoT günümüzde güvenlik sorunları gibi birçok zorlukla karşı karşıya kalmaktadır çünkü bazı IoT cihazları yüksek düzeyde şifreleme yöntemlerini desteklememekte, mülkiyetle ilgili gizlilik sorunları özellikle verilerin ne zaman analiz edileceği ve paylaşılacağı konusunda veri sorunları bulunmaktadır (Whitmore vd., 2015). Ek olarak, yapılı çevrede IoT kullanımı önemli ölçüde artmakta, ancak açık standartlar ve sistemler aracılığıyla aralarında entegrasyon konusunda boşluklar ve zorluklar bulunmaktadır (Dave vd., 2018). Ayrıca, veri gösterimi için çeşitli BIM şemaları ve sensör veri gösterimi için kullanılan çeşitli IoT standartları nedeniyle BIM ve IoT arasında sorunsuz bir entegrasyon oluşturmanın zorlukları bulunmaktadır (Shahinmoghadam & Motamedi, 2019).

2.2.2.2 Operasyon ve Bakım (O&M)

Operasyon ve Bakım (O&M) yönetiminde BIM-IoT tabanlı bir FM uygulamalarına ilişkin araştırma, akıllı varlık yönetimini desteklemeye ve gerçek zamanlı veriler aracılığıyla etkin operasyonlar ve bakım yönetimi sağlamaya odaklanmaktadır (Marquez vd., 2020).

Ekipman arıza tahmini ve Artırılmış Gerçeklik (AR) kullanarak varlık bakımını ve varlık takibini destekleyen bir üniversite binası için dinamik DT geliştirmek için BIM-IoT tabanlı bir FM sistemi önermiştir (Vivi vd., 2019).

COBie ekipman bilgileriyle entegre Kablosuz Sensör Ağı (WSN) kullanarak bakım kontrolleri ve İşletme ve Bakım aşamasında sorunların erken tespiti ile tesis yönetim personeline yardımcı olmak için BIM-IoT tabanlı bir uygulama geliştirmiştir (Suprabhas & Dib, 2017).

Herhangi bir yönetim kararı vermeden önce bakım ve yönetim personelinin hizmet tünellerinin İşletme ve Bakım faaliyetleri hakkında gerçek zamanlı bilgi edinmelerine yardımcı olmak için BIM-IoT tabanlı bir çerçeve önermiştir (Yin vd., 2020).

2.2.2.3 İç Mekân Termal Konfor

Termal konfor, termal ortamdan memnuniyeti ifade eden ve subjektif değerlendirme ile değerlendirilen zihin durumu olarak tanımlanmaktadır (ASHRAE, 2004).

Sensörler kullanarak bina sakinlerinin termal konforunu tahmin eden ve Revit API kullanarak BIM modelinde iç mekân termal konforunu görselleştiren bir platform geliştirmiştir (C.-C. Liu vd., 2016).

Arduino Mikrodenetleyiciden toplanan sensör verilerine dayalı PMV değerlerini hesaplayıp renklendirerek bir mekan için konfor seviyesinin dağılımını görselleştirmek için bir çerçeve geliştirmiştir ve Revit ve Dynamo kullanarak BIM modelini dönüştürmüştür (Chang vd., 2018).

Bina sakinlerinin konfor düzeyine ilişkin içgörüler sağlamak için hareket algılama ve çevresel izleme alanlarında BIM'in IoT ile entegrasyonunu araştırmak için University Ramon'da gelişmiş bir sağlıklı akıllı kampüsler FM konsepti önermiştir (Zaballos vd., 2020).

BIM, IoT ve VR'yi entegre ederek termal konfor koşullarının gerçek zamanlı izlenmesi için sürükleyici bir Sanal Gerçeklik (VR) uygulaması geliştirmiştir (Shahinmoghadam vd., 2021).

2.2.2.4 Enerji Yönetimi

IoT-BIM tabanlı FM sistemi, binalarda enerji performans analizi ve gerçek zamanlı enerji izleme için kapsamlı fırsatlar sunmaktadır (Tang vd., 2019).

Bina sakinleri için enerji tasarrufu ipuçları sağlayabilen, enerji analizi sonuçlarını görselleştirebilen ve güneş enerjisiyle üretilen elektrikten güç tüketmek için kullanılacak elektrikli cihazları tanımlayabilen BIM-IoT tabanlı FM sistemi önermiştir (Chou vd., 2017).

Enerji tüketimini kontrol etmek ve enerji performansını iyileştirmek için Bina Otomasyon Sistemi (BAS) ile entegre Bina Enerji Yönetim Sistemleri (BEMS) için BIM-IoT tabanlı FM sistemi geliştirmiştir (Lee vd., 2016).

2.2.2.5 Acil Durum ve Güvenlik Yönetimi

BIM ve çeşitli sensör türleri IoT-BIM tabanlı FM sistemi, acil durum ve güvenlik yönetiminde etkili araçlar olabilmektedir (Cheng vd., 2017). Gerçek zamanlı yangın bilgisi, alarm yanıtı ve doğrudan verimli tahliye rehberlik sistemi sağlayan yangın güvenliği ve afet önleme sistemini desteklemek için bina için IoT kablosuz sensör ağları ile entegre BIM tabanlı FM sistemi geliştirilmiştir.

Yerinde tehlikeli enerjinin gerçek zamanlı olarak tespit edilmesini desteklemek ve tehlikeli enerjiler arasındaki teması izole etmek için IoT-BIM tabanlı FM sistemini kullanarak petrokimya yapımında tehlikeli enerji için güvenlik bariyeri modeli geliştirmiştir (Ding vd., 2022).

Erken uyarı ve güvenlik riskinin gerçek zamanlı kontrolünü sağlayarak işçilerin güvenliğini desteklemek için BIM-IoT tabanlı FM sistemini kullanan bir yeraltı mühendislik inşaatı güvenlik riski modeli önerilmiştir (Liang & Liu, 2022).

2.2.2.6 Özet

BIM'ler, FM için bina hakkında zengin statik sağlamaktadır. Bununla birlikte, binalar zamanla değişebilir ve bu, yapı yaşam döngüsünün daha iyi anlaşılmasını

gerektirmektedir, BIM ve IoT'yi FM'ye entegre etmek, güncel gerçek zamanlı veriler aracılığıyla bina statülerini izlemenin daha verimli bir yolunu sağlamaktadır.

Gerçek Zamanlı Dinamik veriler, tesis faaliyetlerini iyileştirmek, güvenlik yönetiminin verimliliğini artırmak, İşletme ve Bakım aşamasında tesisin enerji performansını izlemek ve kontrol etmek ve tesis yöneticilerinin karar vermesini desteklemek için yeni işlevler sağlamaktadır.

IoT-BIM tabanlı FM entegrasyonu, şu anda güvenlik ve gizlilik sorunları gibi birçok zorlukla karşı karşıya kalınmaktadır. Ek olarak, çeşitli BIM ve IoT şemaları nedeniyle açık standartlar aracılığıyla aralarında entegrasyon ve BIM ile IoT arasında sorunsuz bir entegrasyon oluşturma konusunda boşluklar ve zorluklar bulunmaktadır.

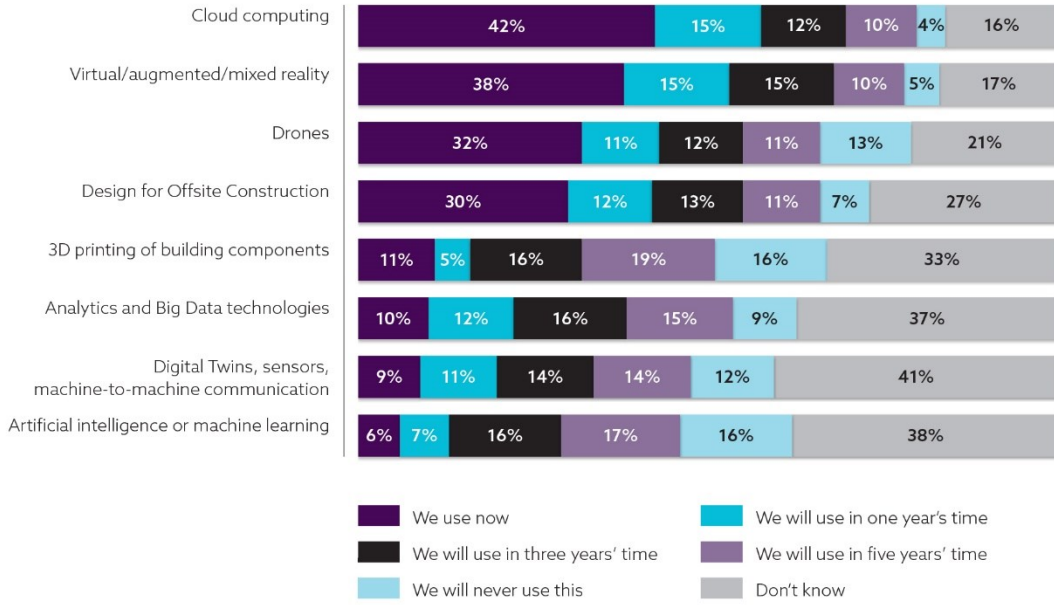
2.2.3 Bulut Tabanlı Dijital İkiz

2.2.3.1 Uygulamalar ve Zorluklar

Bu seviyenin uygulanması, projeleri etkin ve verimli bir şekilde yönetmek için bina sahipleri, tesis yöneticileri, mimari ve inşaat şirketleri arasında iletişime ve bilgi alışverişine yardımcı olmak için bulut bilişimi BIM ve FM ile entegre etmek için pratik ve etkili bir çerçeve sağlamayı amaçlamaktadır.

Bulut bilişimi, BIM ve FM ile entegre etmek, Yapı Yaşam Döngüsü Yönetimi (BLM) boyunca iş birliği düzeyini iyileştirerek ve maliyetleri azaltarak tüm AEC endüstrisinde yeni olanaklar ve yönler sağlamaktadır (Ding & Xu, 2014).

2020'deki NBS 10. Ulusal BIM Raporuna göre, çoğu AEC sektör profesyoneli tarafından bulut bilişimle ilgili olarak kullanılan teknoloji verilerine bakıldığında %42'sinin bulut bilişimi kullandığı ve %37'sinin beş yıl içinde bulut bilişimi kullanmayı planladığı görülmektedir.



Şekil 18: Çoğu AEC Endüstri Profesyoneli Tarafından Kullanılan Teknolojiler
Kaynak: (NBS 10th Annual BIM Report, 2020)

Ancak, Autodesk Construction Cloud ve Trimble Connect gibi mevcut bulut tabanlı BIM hizmetlerini kullanmanın sınırlamalarından biri, bu hizmetlerin kendi kapalı formatlarını desteklemesi ve IFC gibi açık formatlardan dinamik bir bilgi alışverişine izin vermemesidir. Örnek olarak IFC'den gelen verileri tamamlamak yerine verilerin sorgulamaya izin vermesi durumu verilebilmektedir (Oti vd., 2016b).

McGraw Hill Construction'ın Büyük Küresel Pazarlarda İnşaat için BIM'in İş Değeri hakkındaki son raporuna göre, birçok ülkedeki müteahhitler bulut tabanlı hizmetlerin güvenliğiyle ilgili orta ila yüksek düzeyde endişelerini dile getirmektedirler (Cassino vd., 2014).

Ek olarak, işletme ve bakım aşamasında BIM-bulut hizmetlerinin tesis yönetim sistemiyle entegre edilmesi, verilerin birlikte çalışabilirliği ile ilgili entegrasyon sorunlarına ve benimsenmesi için belirsiz strateji nedeniyle veri kaybına ayrıca bulutta bilgileri koruyabilen ve güncelleyebilen deneyimli bir ekipten oluşan bir yığma neden olabilmektedir (Mahamadu vd., 2013; Wong vd., 2014).

2.2.3.2 Operasyon ve Bakım (O&M)

Bulut Sistem-BIM sistemi sadece BIM modellerini görselleştirmek ve manipüle etmekle kalmamakta; ayrıca İşletme ve Bakım aşamasında mühendislik projesinin kontrol edilmesine ve izlenmesine etkin bir şekilde yardımcı olmaktadır (Chuang vd., 2011).

Tesis işletimini ve yönetimini desteklemek için IoT sensörleri kullanılarak gerçek zamanlı olarak görselleştirilebilen yapı yaşam döngüsü boyunca kullanım sonrası değerlendirme (POE) verilerini yakalamak için BIM bulut tabanlı sistem önerilmiştir (Edirisinghe & Woo, 2021).

Bilgi yönetimi ve karar vermenin etkinliğini artırmak için Yapı Yaşam Döngüsü Yönetimi (BLM) için akıllı bilgi yönetim sistemini etkinleştirmek için BIM-FM-IoT tabanlı bir bulut sistemi önermiştir (Han & Ye, 2018).

2.2.3.3 İç Mekân Termal Konfor

Binada çevresel sürdürülebilirliği desteklemek ve bina için termal konforu optimize etmek için BCA Yeşil İşaret puanı gereksinimine göre Zarf Termal Transfer Değeri (ETTV) hesaplamasını doğrulamak için ortak bir veri ortamı (CDE) görevi gören BIM-Bulut tabanlı bir platform geliştirmiştir (Z. Liu, Wang, vd., 2020).

2.2.3.4 Proje İş Birliği

Kapsamlı bir modelde bilgi paylaşımı için işbirlikçi bir yol sağlayan IFC şeması ve NoSQL kullanarak BIM modellerini zenginleştirmek ve paylaşmak için bulut tabanlı bir yaklaşım önermiştir (L. Ma & Sacks, 2016).

Entegre bir bulut modelinde yaşam döngüsü oluşturarak bileşenler oluşturmak için paydaşlar arasında bilgi yönetimini ve iş birliğini kolaylaştırmayı amaçlayan özel bulut kullanarak BIM-FM tabanlı çerçeve geliştirmişlerdir (Das vd., 2014),.

2.2.3.5 Özet

Önceki çalışmalarda, FM'deki BIM uygulamasının kapsamlı bir incelemesi sunulmuş ve bilgi boşlukları tespit edilmiştir. BIM'in FM'de başarılı bir şekilde uygulanması, BIM özellikli FM için veri gereksinimlerini tanımlamayı, bu verileri iyi yapılandırılmış biçimde düzenlemeyi ve çeşitli BIM ve FM sistemleri arasında kesintisiz bilgi alışverişi iş akışı sağlamayı gerektirmektedir. Bilgiler sorunsuz bir şekilde değiş tokuş edildiğinde BIM, tesis faaliyetlerini iyileştirmek, güvenlik yönetiminin verimliliğini artırmak, İşletme ve Bakım aşamasında tesisin enerji performansını izlemek ve kontrol etmek ve tesis yöneticilerinin karar vermesini desteklemek için yeni işlevler sağlamaktadır. Bununla birlikte, FM'deki BIM uygulaması, veri alışverişi formatı ve bilgi yönetim sistemi ve bilgi FM veri gereksinimi eksikliği nedeniyle hala zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır.

2.2.4 BIM, FM, IoT ve AI

2.2.4.1 Uygulamalar ve Zorluklar

Bu düzeydeki çalışmalar, yapay zekanın potansiyel sorunlarına veya makinelerde düzeltilmesi gereken bakım çalışmalarına dayalı kararlar vermesini sağlayan IoT sensörlerinden toplanan büyük verileri entegre etmekte ve sonuç olarak işletme sahibi, oluşabilecek herhangi bir teknik sorundan önceden haberdar olmaktadır. Ele alınması gereken bir konu haline gelmektedir. Yapay zekanın ana zorluklarından biri, kalıpları tanımlamak için eğitilebilecek büyük miktarda veriye sahip olmadığı sürece doğru bir tahmin vermemesidir (Ribeiro vd., 2016).

Ek olarak, yapay zekayı benimsemek, en iyi sonuçları elde etmek için bu verileri organize etmek, sürdürmek ve eğitmek için bir yapay zeka uzmanı tutan büyük miktarda veriye sahip yapay zeka eğitim modelini geliştirmek için yüksek başlangıç maliyetleri gerektirmektedir (Ali vd., 2019).

2.2.4.2 İşletme ve Bakım (O&M)

Kunming Changshui Uluslararası Havalimanı'nın yeni terminali için işletme ve bakım aşamasında BIM ve veri madenciliğini entegre etmek için bir yaklaşım önermiştir. Havaalanı terminalinin tesis yöneticileri için toplamda malzeme, alan ve onarım programlarının optimize edilmesine ilişkin öneriler sunan anlamlı yasa ve kalıpları çıkarmışlardır (Peng vd., 2017).

Bina Otomasyon Sisteminden (BAS) ve ısıtma havalandırması ve iklimlendirme (HVAC) üzerine kurulu IoT'den toplanan verileri kullanan Makine Öğrenimi (ML) yaklaşımına dayalı bina kurulumları için bir tahmine dayalı bakım çerçevesi önermişlerdir (Bouabdallaoui vd., 2021).

2.2.4.3 İç Mekan Termal Konfor

Birçok sensörden oluşan Kablosuz Sensör Ağları (WSN) tarafından toplanan gerçek zamanlı çevresel verilerden termal konforu hesaplamak için Revit ve MATLAB sinir ağı kullanılarak iç mekan termal konforunu ve enerji tasarrufu verimliliğini artırmak için BIM ve Yapay Sinir Ağı (ANN) toplamak için öneride bulunmuşlardır (G. Ma vd., 2019).

2.2.4.4 Enerji Yönetimi

Şanghai Doğu Hastanesi için genel enerji tüketimini iyileştiren, tesis hatalarını ve talep edilen onarımları azaltan tahminler ve performans analizleri yapmak için yapay zeka derin öğrenme modellerini kullanarak IoT tarafından toplanan gerçek zamanlı çevresel verileri analiz etmek için bir BIM-Dijital İkiz sistemi geliştirmişlerdir. (Peng vd., 2020).

2.2.4.5 Acil Durum ve Güvenlik Yönetimi

Tehlike türüne ve tehlike düzeyine göre gerçek zamanlı bina işletim durumunu değerlendirmek için denetimli makine öğrenme modeliyle (Destek Vektör Makineleri) IoT sensörleri tarafından toplanan operasyon bilgilerini analiz ederek spor tesisi için

bir kapalı güvenlik yönetim sistemi için bir BIM dijital ikiz çerçevesi geliştirmişlerdir ve bu sonuçları BIM modelinde görselleştirmişlerdir (Z. Liu, Zhang, vd., 2020).

2.2.4.6 Özet

Önceki çalışmalarda, BIM, FM ve tespit edilen bilgi boşluklarında AI uygulamasının kapsamlı bir incelemesi sunulmuştur. AI, AEC endüstrisine rekabet avantajı sağlamaktadır. Yapay zekayı BIM ile entegre eden IoT tesis yönetim sistemleri, tesis faaliyetlerini iyileştirmek, güvenlik yönetiminin verimliliğini artırmak, İşletme ve Bakım aşamasında tesisin enerji performansını izlemek ve kontrol etmek ve tesis yöneticilerinin karar vermesini desteklemek için yeni bir işlevsellik sağlamaktadır.

Yapay zekanın benimsenmesi şu anda eğitilecek büyük miktarda veri, gereklilik, yüksek başlangıç maliyetleri ve en uygun sonuçları elde etmek için yetenekli uzmanlar gibi birçok zorlukla karşı karşıya kalmaktadır.

2.3 Sonuç

Bu bölüm, çalışmanın temel çıkarımlarını sunmaktadır. Araştırmanın ana hedefi, bir binada oturanların sağlığı ile ilgili iç ortam kalitesini iyileştirmek için akıllı teknolojilerden faydalanılabilecek bir arayüz oluşturmaktır.

Bu bölümde IoT izleme sistemi üzerinde yapılan çalışmalara odaklanılmıştır. İç ortam kalite yönetimi alanında düşünme ve uygulama biçiminde son on yılda büyük bir gelişme gösterilmiştir.

Bu bölüm, önceki çalışmalarda karşılaşılan ve aşağıdaki gibi özetlenebilecek birçok boşluğu tanımlamıştır:

FM'de BIM uygulaması, veri alışverişi formatı ve bilgi yönetim sisteminde, alışveriş sırasındaki ve organize verilerin eksikliği nedeniyle zorluklarla karşılaşmaktadır.

- IoT'de BIM uygulaması, çeşitli BIM ve IoT şemaları nedeniyle BIM ve IoT arasında kusursuz bir entegrasyon oluşturmada zorluklarla karşılaşmaktadır.
- Bulutta BIM ve IoT uygulaması, birçok BIM yazılımı buluttan doğrudan gerçek zamanlı veri alışverişini desteklemediğinden, veri alışverişi formatı ve bilgi konusunda hâlâ zorluklarla karşılaşmaktadır.
- Bazıları sensörlerden veri toplayıp gerçek zamanlı olarak buluta gönderebilse de, önceki çalışmaların hiçbiri bulut ile Dijital İkiz modeli arasında gerçek zamanlı bir veri alışverişi kurulamamıştır. Önceki çalışmalarda, sensör verilerinin buluttan indirilmesi, verilerin CSV biçiminde veya SQL veri tabanında düzenlenmesi ve Dijital İkiz modeli oluşturmak için ek bir araç kullanılarak manuel olarak BIM modeline aktarılmasını içeren yöntemler kullanılmıştır.

Aşağıdaki bölüm, bir Dijital İkiz modelinde iç mekan çevre kalite yönetimi için önerilen uygun teknolojileri ve sistemleri entegre etmek ve gerçek durumlarda tesis yönetimini izlemek ve iyileştirmek için bir yaklaşım sunmaktadır. Ayrıca, vaka çalışmasıyla, önceki çalışmalardan tespit edilen boşlukları doldurmak için birçok çözüm sunmaktadır.

3. VAKA ÇALIŞMASI

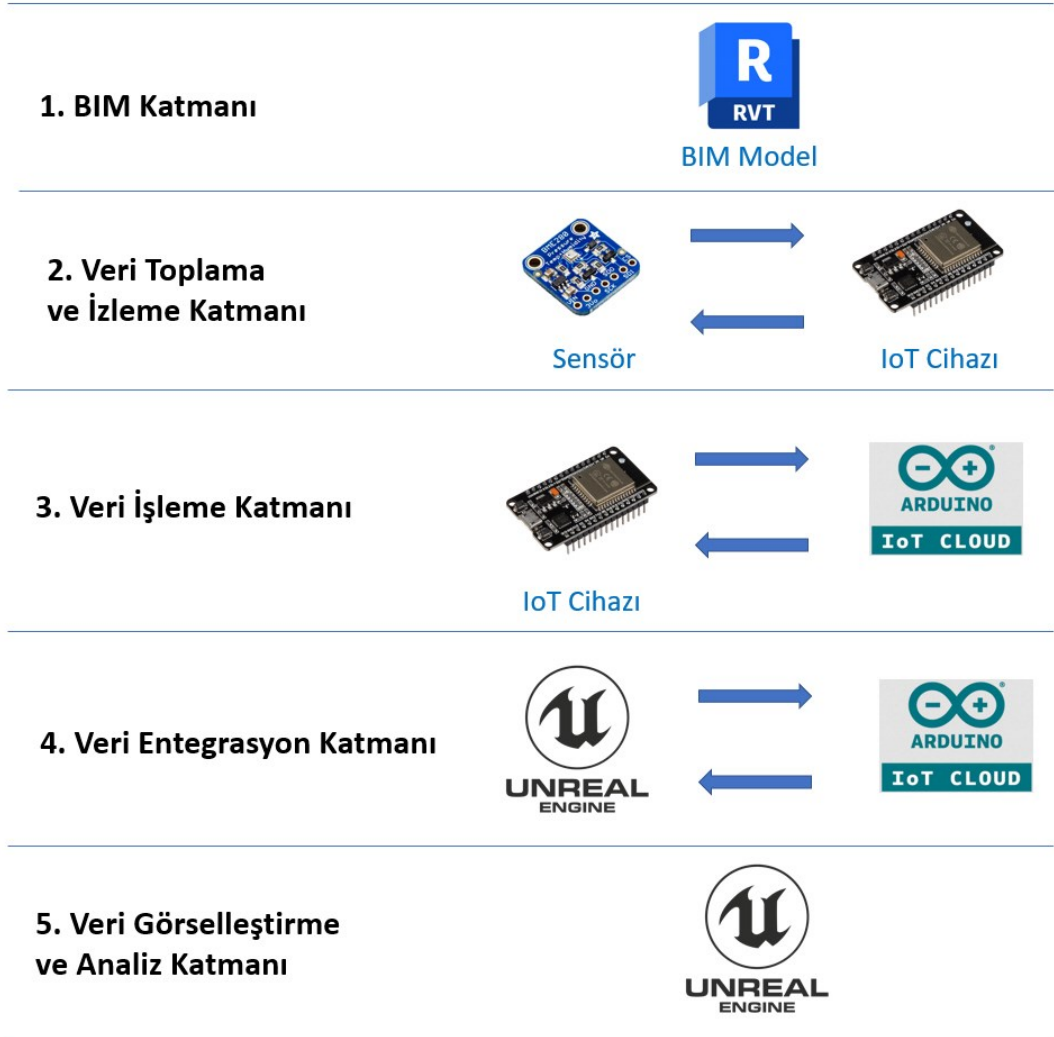
Bu bölüm vaka çalışması olarak yapılan projeyi açıklamaktadır. Bu vaka çalışması için benimsenen proje alanı, İstanbul'un Şişli ilçesinde bulunan Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Bomonti Kampüsü'ne dayanmaktadır. Bu yapı 14 katlı bir binadır ve 6 tipik kat bulunmaktadır. 8'i bodrum, çatı katı, teknik alan ve bir katı da konferans salonları için ayrılmıştır.

Önceki çalışmaların literatür taraması, yapıyı çevrenin ideal bir Dijital İkizinin özelliklerini oluşturmak için temel anlayışı sağlamıştır. Literatür incelemelerinden özetlenen iş akışının ardından, Bomonti Kampüsü için bir dijital ikiz oluşturmak için beş katmandan oluşan bir çerçeve önerilmiş, ayrıntılı olarak tartışılmış ve kısaca aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

- 1. BIM Katmanı (As-Built BIM Modeli):** Birinci katman, Autodesk Revit kullanılarak yapılmış BIM modeline sahip, inşa edildiği haliyle gerçek bir fiziksel yapıyı temsil eden dijital bir varlık, model Mimari, Yapıyı ve MEP öğeleri içermektedir. BIM modeli, COBie formatı kullanılarak hazırlanan işletme ve bakım aşaması için tesis yönetimi için gerekli veriler olan 3B geometri olan grafik bilgileri ve grafik olmayan bilgileri içermektedir.
- 2. Veri Toplama ve İzleme Katmanı (IoT İç Ortam Kalite İzleme Sistemi):** İkinci katman, sıcaklık, nem, PM2.5 gibi IoT sensörlerini kullanarak binanın iç ortamındaki çeşitli fiziksel olayları algılamak ve ölçmek için Kablosuz Sensör Ağlarından (WSN'ler) oluşmaktadır. CO₂ ve gerçek zamanlı aydınlatma, iç mekan çevre kalitesinin izlenmesine yardımcı olmaktadır.
- 3. Veri İşleme Katmanı (IoT Bulut Platformu):** Üçüncü katman, Arduino IoT Cloud kullanılarak fiziksel yapıdan dijital varlığa tek yönlü akış yoluyla sensörlerden ve IoT cihazlarından gerçek zamanlı olarak toplanan verileri elde etmektedir.

4. **Veri Entegrasyon Katmanı:** Dördüncü katman, sensör veri parametrelerinin özelliklerini Revit'teki sensör cihaz ailesi parametreleriyle eşleştiren ve ardından bulut tabanlı bir Unreal Engine 5'te veri tabanından sensör verilerini Revit'teki sensör ailesi cihazına eşlemektedir.
5. **Veri Görselleştirme Katmanı (Unreal Engine 5):** Beşinci katman, Unreal Engine 5 UI bileşenlerinde görselleştirilen BIM modeli ve sensör verilerini birleştirmektedir. Bu, kullanıcının uygulama ile etkileşime girdiği yer olarak tanımlanmaktadır.

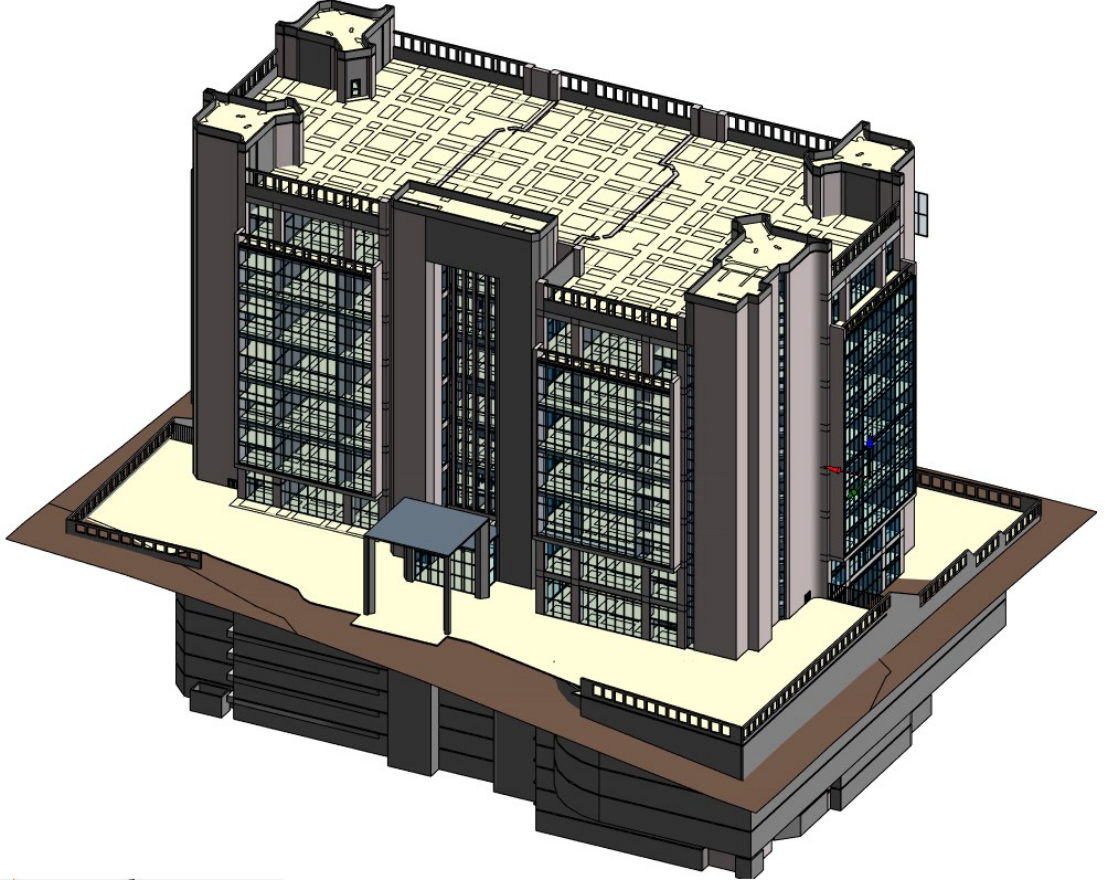
Ek olarak, dijital ikizde iç ortamın izlenmesi ve kontrol edilmesi için sensörlerle iletişim kuracak olan AI ses yardımı ile desteklenen bulut ve IoT sensörleri arasında iki yönlü entegrasyonu sağlamaktadır.



Şekil 19: Dijital İkiz çerçeve seviyeleri

3.1 BIM Katmanı (As-Built BIM Model)

Çalışma kapsamında, tek bir birlikte çalışabilir veri seti ile BIM kullanan yapılı çevre için ürün yaşam döngüsü yönetiminin uyarlanması olan bina yaşam döngüsü yönetimini etkinleştirmek için Revit kullanılarak bina için yerleşik bir BIM modeli oluşturulmuştur. Amaç, operasyonel yaşam döngüleri boyunca binaların operasyonlarını ve bakımını yönetmek için bina bilgilerini kullanmak ve sürdürmek için verimli bir ortam yaratmaktır.



Şekil 20: Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Bomonti Kampüsü, Revit BIM modeli

3.1.1 COBie Parametre Eşleme

Revit için Autodesk COBie Uzantısı, operasyon verilerini, bakım verilerini ve tesis varlık yönetimini COBie formatında yakalamak için kullanılmıştır. Modeldeki verileri tutmak için paylaşılan parametreler kullanılmıştır. Bu parametreler “Custom Parameter Mapping” özelliği kullanılarak özelleştirilebilmektedir. Veri türü statik veridir, veriler kaydedildikten sonra bina bilgilerini otomatik olarak güncelleyememektedir.



Şekil 21: Revit için COBie Uzantısı. BIM Birlikte Çalışabilirlik Araçları Araç Çubuğu Menüünden

3.1.1.1 COBie Kişileri

BIM Birlikte Çalışabilirlik Araçları araç çubuğu menüsünden Kişileri değiştir düğmesine tıklamak, COBie kişilerini eklemeye, düzenlemeye veya silmeye olanak tanıyan yeni bir pencere açmaktadır. Bu, Kişiler için gerekli ve isteğe bağlı alanların atanmasına izin vermektedir, gerekli alanlar için eksik veriler COBie uzantısı tarafından oluşturulamamaktadır.

Autodesk BIM Interoperability Tools | COBie Extension

AUTODESK COBIE EXTENSION FOR REVIT

Contacts

Create and edit COBie contacts in this Revit model

Contact List

Add Contact...

moutaman.sabbagh@gmail.c... X

Required

CreatedBy: moutaman.sabbagh@gmail.com

Email: moutaman.sabbagh@gmail.com

Company: Mimar Sinan Fine Arts University

Phone: +90 534 555 55 55

Category: Ro_50_10_03 : Architect (A) ...

Optional

CreatedOn: 8/29/2022 1:00:35 PM

GivenName: Moutaman Mert

FamilyName: Hocaoglu

Department: Informatics Department

OrganizationCode: MSGSU

Street: Cumhuriyet Mah. Silahşör Cad. No:89

PostalBox:

Town: Bomonti, Şişli

StateRegion: İstanbul

PostalCode: 34380

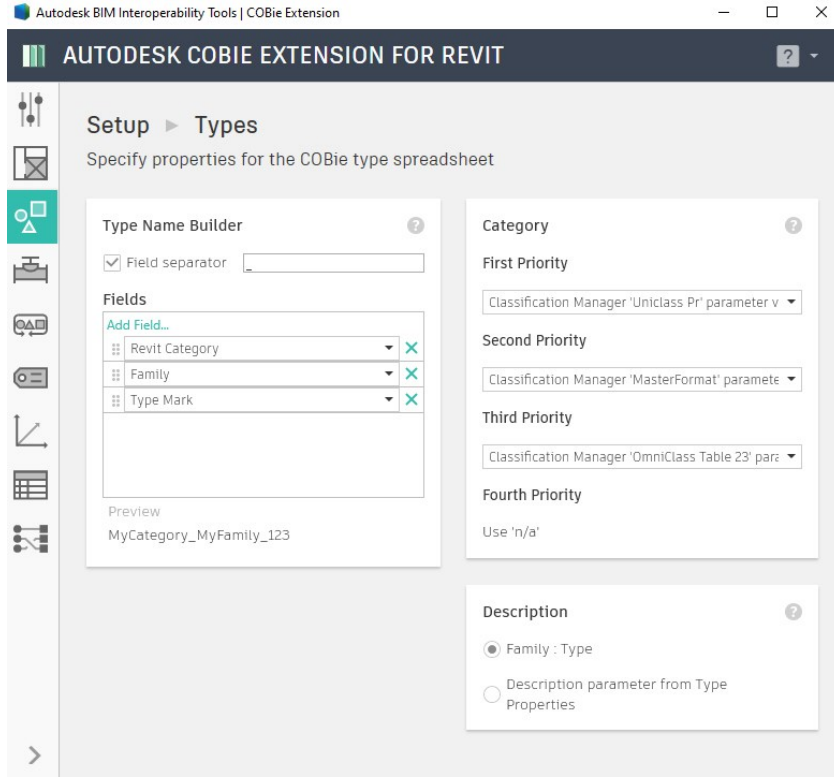
Country: Turkey

ExternalIdentifier: 27485026-d94e-4276-94c6-348792ac004e

Şekil 22: COBie Kişileri Penceresi

3.1.1.2 COBie Türü

COBie Türü sekmesi, öğenin tür adının nasıl yapılandırılacağına belirlendiği yer olarak tanımlanmaktadır. COBie verileri, MasterFormat UniFormat, Omniclass ve Uniclass gibi Yapı Spesifikasyonları Enstitüleri tarafından sağlanan bir sınıflandırma sistemi kullanılarak düzenlenebilmektedir.

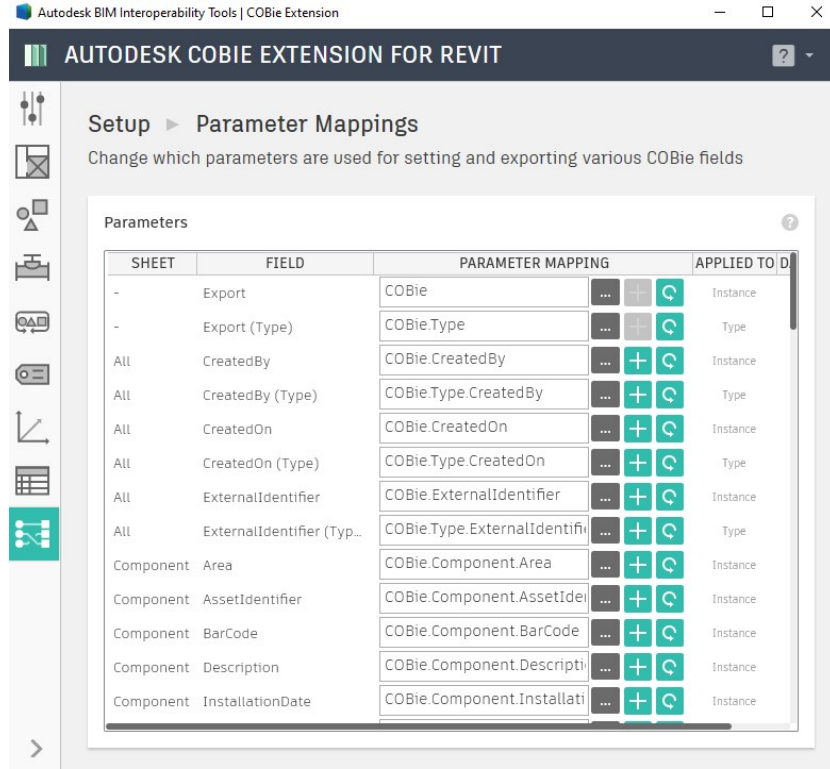


Şekil 23: COBie Type Penceresi

3.1.1.3 COBie Kurulum Projesi

Kurulum Projesi, Revit modelinde gerekli COBie parametrelerini oluşturabilmekte ve bu parametreleri uygun verilerle uygun öğelere uygulayabilmektedir. BIM Birlikte Çalışabilirlik Araçları araç çubuğu menüsünden Proje Kurulumu düğmesine tıklamak, aşağıdakileri sağlayan yeni bir pencere açmaktadır:

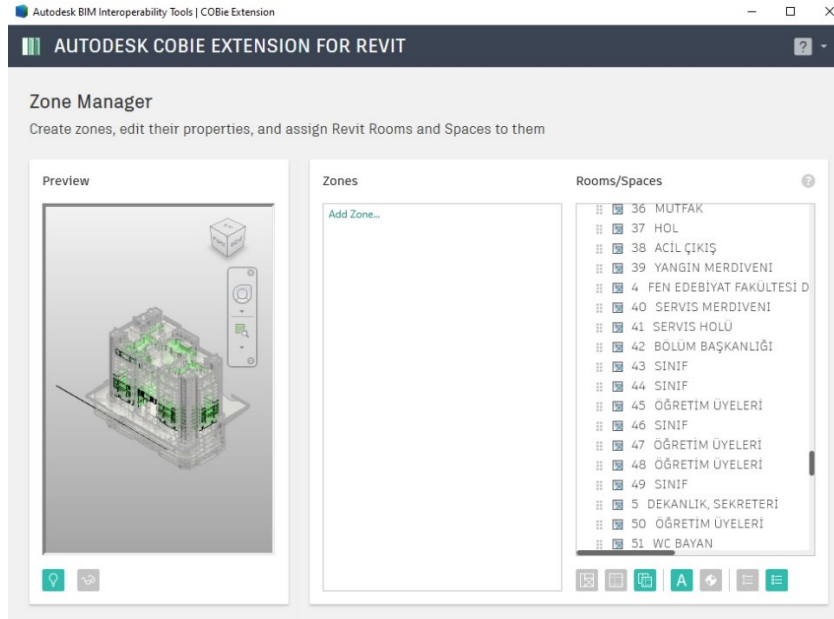
- COBie ayarlarını tanımlayın.
- Revit modelinde elektronik tablo için COBie alanları, türleri, bileşenleri, sistemleri, nitelikleri, koordinatları ve zamanlamaları için özellikleri belirtin.
- Alanlar için parametre eşlemelerini ve değerlerini tanımlayın.



Şekil 24: COBie Kurulum Penceresi, Parametre Eşlemeleri

3.1.1.4 COBie Bölge Yöneticisi

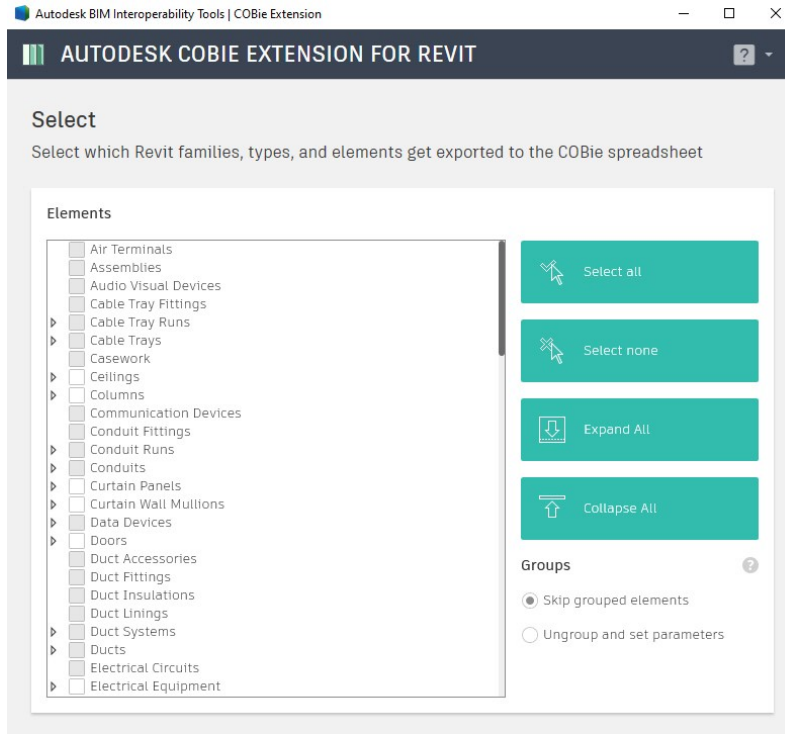
Bölge Yöneticisi, Revit öğelerinin sınıflandırmasını temel almaktadır. COBie Bölgeleri, Revit Odaları ve Alanları tarafından tanımlanmaktadır. Bölge Yöneticisi hiyerarşik olarak COBie Bölgeleri oluşturmaktadır.



Şekil 25: COBie Bölge Yöneticisi Penceresi

3.1.1.5 COBie Seçimi

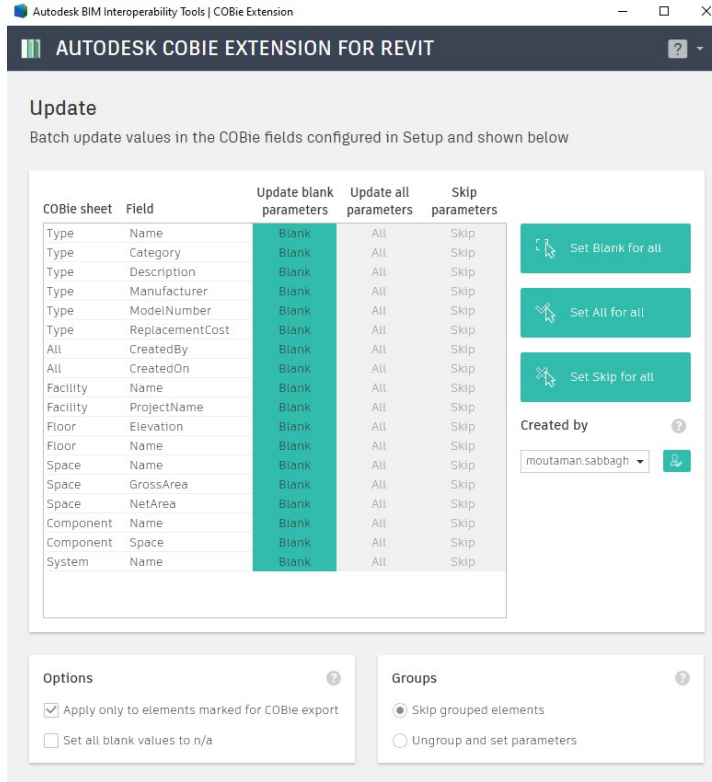
Revit modelinde mevcut Revit ailelerinin, türlerinin ve öğelerinin bir listesini hazırlayarak bunları dışa aktarmak için hangi öğelerin COBie elektronik tablosuna aktarılacağını seçmek için İzin Ver seçilmektedir. Uygula düğmesine basıldığında araç, seçilen aileler, türler ve öğeler için COBie parametrelerini kontrol etmektedir.



Şekil 26: COBie Seçim Penceresi

3.1.1.6 COBie Güncellemesi

Güncelleme, COBie alanlarındaki değerleri toplu olarak değiştirmekte ve bu verileri COBie Uzantısı parametresine veya herhangi bir uygun eşlenmiş parametreye atamak için kurulumda belirtilen ayarları kullanarak uygun verileri oluşturmaktadır. Tüm parametreleri güncelleme seçilerek, sadece parametreler boş bırakılmalı veya bu işlem atlanmalıdır. Grupların içindeki öğeler, özelleştirilmiş verilerin eşlenen parametrelerinde doğru bir şekilde yazılmasına izin vermemektedir. Bu durum da uzantının bu sorunu düzeltme seçeneklerini sunma şekli olarak görülmektedir. İlk seçenek, gruplanmış öğeleri atlamak, ikinci seçenek ise, verilerin doğru yazılmasına izin vermek için öğelerin grubunu çözmektir.



Şekil 27: COBie Güncelleme Penceresi

3.1.1.7 Revit'te COBie Parametre Eşleme

COBie Parametreleri, model aracılığıyla çeşitli düzeylerde ve gruplarda atanmaktadır. Bunlar, veri normalleştirmeyi en iyi şekilde kolaylaştırmak için düzenlenmiştir. Örnek olarak COBieWarrantyDescription bir tür düzeyi parametresi iken COBieWarrantyStartDate ise bir örnek düzeyi parametresi olarak belirtilmektedir.

Type Properties

Family: Air Conditioning - TOSHIBA RAV-RM561FT Load...

Type: Colonna VRF-036-056 Duplicate... Rename...

Type Parameters

Parameter	Value
Data	
COBie.Type.ExternalIdentifier	
COBie.Type	<input checked="" type="checkbox"/>
COBie.Type.CreatedBy	moutaman.sabbagh@gmail.com
COBie.Type.CreatedOn	2022-09-01T09:30:00
COBie.Type.Name	Air Conditioning - TOSHIBA RAV-RM561FT
COBie.Type.Category	Pr_70_65_03_72 : Room air conditioning units
COBie.Type.Description	TOSHIBA RAV-RM561FT standing unit air conditioner , Cool
COBie.Type.AssetType	Fixed
COBie.Type.Manufacturer	TOSHIBA
COBie.Type.ModelNumber	RAV-RM561FT
COBie.Type.WarrantyGuarantorParts	
COBie.Type.WarrantyDurationParts	
COBie.Type.WarrantyGuarantorLabor	technical.enquiries@toshiba-ac.com
COBie.Type.WarrantyDurationLabor	2
COBie.Type.WarrantyDurationUnit	Year
COBie.Type.ReplacementCost	
COBie.Type.ExpectedLife	
COBie.Type.DurationUnit	
COBie.Type.WarrantyDescription	
COBie.Type.NominalLength	
COBie.Type.NominalWidth	
COBie.Type.NominalHeight	
COBie.Type.ModelReference	
COBie.Type.Shape	
COBie.Type.Size	390D x 600W x 1750H mm
COBie.Type.Color	White

Classification.Uniclass.EF.Number	
Classification.Uniclass.EF.Description	
Classification.Uniclass.Pr.Number	Pr_70_65_03_72
Classification.Uniclass.Pr.Description	Room air conditioning units
Classification.Uniclass.Ss.Number	
Classification.Uniclass.Ss.Description	
Classification.Omniclass.21.Number	
Classification.Omniclass.21.Description	
Classification.Omniclass.22.Number	
Classification.Omniclass.22.Description	
Classification.Omniclass.23.Number	23-33 39 11
Classification.Omniclass.23.Description	Air Conditioners
Classification.MasterFormat.Number	23 81 16
Classification.MasterFormat.Description	Room Air-Conditioners
Classification.UniFormat.2010.Number	D30
Classification.UniFormat.2010.Description	Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC)

Şekil 28: Mekanik Ekipman için COBie Tipi Seviye Parametresi (Sol), COBie Örnek Seviyesi Parametresi (Sağ)

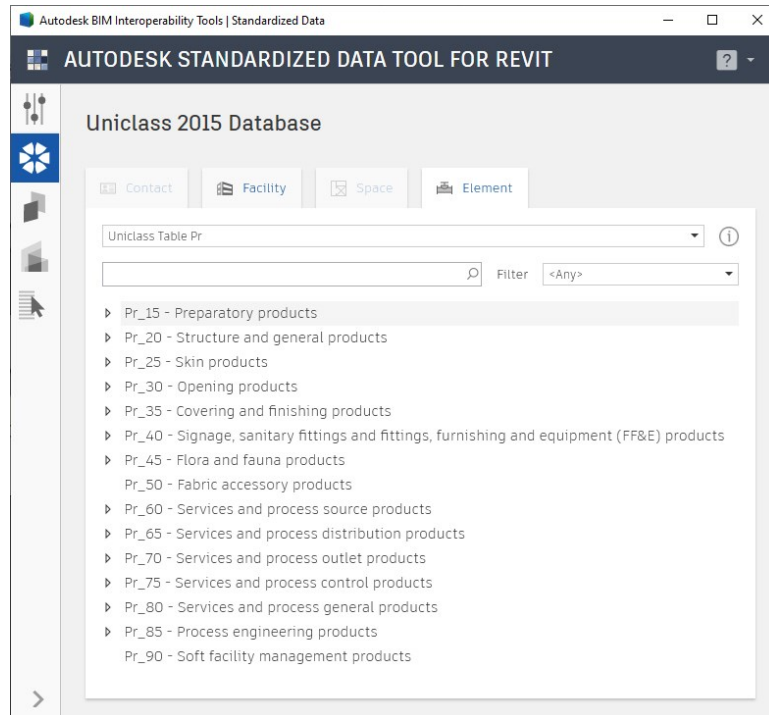
3.1.2 Sınıflandırma Yönetim Sistemleri Parametre Eşleme

Bu aşamada birden çok sınıflandırma yönetim sistemi, Revit parametreleriyle eşleştirilmiştir:

1. **MasterFormat:** İnşaat işi sonuçlarını, gereksinimleri, ürünleri ve etkinlikleri düzenlemek için bir ana listedir. Çoğunlukla ihale ve şartnamelerde kullanılan MasterFormat, Kuzey Amerika kökenlidir ve İnşaat Spesifikasyonları Enstitüsü (CSI) ve İnşaat Spesifikasyonları Kanada (CSC) tarafından üretilmektedir.
2. **UniFormat:** Bir tesisin fiziksel bölümleri etrafında organize edilen, fonksiyonel elemanlar olarak bilinen ve esas olarak maliyet tahminleri için kullanılan inşaat bilgilerini düzenlemek için var olan yöntemdir. UniFormat, Kuzey Amerika kökenlidir ve İnşaat Spesifikasyonları Enstitüsü (CSI) ve İnşaat Spesifikasyonları Kanada (CSC) tarafından üretilmektedir.

3. **OmniClass:** Proje yaşam döngüsünde yapılı çevredeki tüm nesnelere için ürün bilgilerinin düzenlenmesi, sıralanması ve alınması için var olan yöntemdir. OmniClass, Kuzey Amerika kökenlidir ve İnşaat Spesifikasyonları Enstitüsü (CSI) ve İnşaat Spesifikasyonları Kanada (CSC) tarafından üretilmektedir.
4. **Uniclass:** Tasarım ve yapım sürecinin tüm yönleri için var olan sistemdir. Özellikle kütüphane materyallerinin düzenlenmesi ve ürün literatürünün ve proje bilgilerinin yapılandırılması için kullanılmaktadır. Uniclass, Birleşik Krallık kökenlidir ve İnşaat Endüstrisi Proje Bilgi Komitesi (CPIC) ve Ulusal Yapı Şartnamesi (NBS) tarafından üretilmektedir.

Sınıflandırma yönetim sistemlerini yakalamak için Revit özelinde Autodesk Standardized Data Tool kullanılmıştır. Modeldeki verileri tutmak için paylaşılan parametreler kullanılmıştır. Bu parametreler “Custom Parameter Mapping” özelliği kullanılarak özelleştirilebilmektedir.



Şekil 29: Revit için Autodesk Standardize Veri Aracı

Veri türü statik veridir, veriler kaydedildikten sonra bina bilgilerini otomatik olarak güncellenememektedir.

Classification.Uniclass.EF.Number	
Classification.Uniclass.EF.Description	
Classification.Uniclass.Pr.Number	Pr_70_65_03_72
Classification.Uniclass.Pr.Description	Room air conditioning units
Classification.Uniclass.Ss.Number	
Classification.Uniclass.Ss.Description	
Classification.OmniClass.21.Number	
Classification.OmniClass.21.Description	
Classification.OmniClass.22.Number	
Classification.OmniClass.22.Description	
Classification.OmniClass.23.Number	23-33 39 11
Classification.OmniClass.23.Description	Air Conditioners
Classification.MasterFormat.Number	23 81 16
Classification.MasterFormat.Description	Room Air-Conditioners
Classification.UniFormat.2010.Number	D30
Classification.UniFormat.2010.Description	Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC)

Şekil 30: Revit'te bir Mekanik Ekipman için Yönetim Sınıflandırma Sistemleri Verilerinin Haritalanması

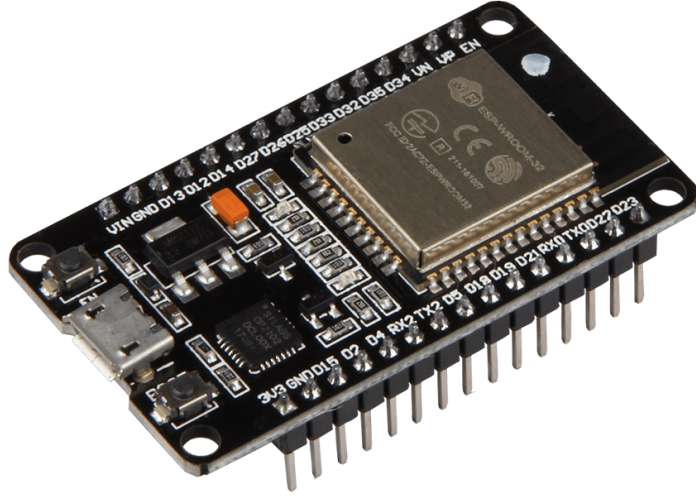
3.2 Veri Toplama ve İzleme Katmanı (IoT İç Ortam Kalite İzleme Sistemi)

Bu vaka çalışmasında, İç Ortam Kalitesini (IEQ) gerçek zamanlı olarak izlemek için fiziksel varlığa IoT sensör cihazları yerleştirilmiştir.

İç Mekan Çevre Kalitesi (IEQ), bir binanın içindeki kişilerin sağlığı ile ilgili bir binanın çevresinin kalitesini ifade etmektedir (Abbaszadeh vd., 2006; Azar vd., 2020a; Mujan vd., 2019). IEQ, İç Hava Kalitesi (IAQ), termal konfor, görsel konfor ve akustik konfor gibi birçok faktör tarafından belirlenmektedir (Sarbu & Sebarchievici, 2013).

Daha iyi iç mekan çevre kalitesi elde etmek, bina sakinlerinin yaşamları iyileştirebilmekte, stresi ve olası yaralanmaları azaltabilmektedir (Choi, 2017; Nurqamarina vd., 2018).

IoT İç Ortam Kalite İzleme Sistemi kullanılarak ESP32 çip üzerinde sistem (SoC) mikrodenetleyici olarak geliştirilmiştir. ESP32, entegre Wi-Fi ve Bluetooth ile güçlü, küçük, düşük maliyetli ve ultra düşük güç tüketimi SoC mikro denetleyicisi olarak tanımlanmak mümkündür. Tüm sensörleri bağlamak için birkaç ESP32 mikrodenetleyici kullanılmıştır.



Şekil 31: ESP32 çip üzerinde sistem (SoC) mikrodenetleyici

Kategori	Sensör	Sensör Verileri	Ölçü birimi	Ölçüm aralığı	Doğruluk
Hava kalitesi	PM2.5	Partikül Madde	ug/m3	0 to 1000 ug/m3	± 5%
	MG-811	Karbon Dioksit	ppm	0 to 5000 ppm	±100 ppm
Termal Konfor	BME280	Sıcaklık	°C	-40 to 85°C	±1.0°C
		Bağıl nem	% R_h	0 to 100 %	±3%
		Barometrik basınç	hPa	300 to 1100 hPa	±1 hPa
Görsel Konfor	TSL2591	Aydınlık	Lux	0.000118 to 88,000	±1%
Akustik	KY-037	Ses basınç seviyesi	dB	0 to 115 dB	±2dB

Tablo 2: İç Mekan Hava Kalitesi Sensörleri

Sensörler, Türkiye pazarında mevcut olan en doğru sensörler temel alınarak seçilmiştir ve bu sensörler bilişim laboratuvarına yerleştirilmiştir.

3.2.1 İç Mekan Hava Kalitesi (IAQ)

Hava kirliliği, kimyasal elementleri ve gazları havaya salan fosil yakıtların yanması nedeniyle dış ve iç ortamın kirlenmesi olarak tanımlanmaktadır (Schikowski & Hüls, 2020). Hava kirliliği, iklim değişikliğine sebep olmakta ve çevresel sağlık risk faktörlerine maruz kalmayı artırmaktadır (Anenberg vd., 2020).

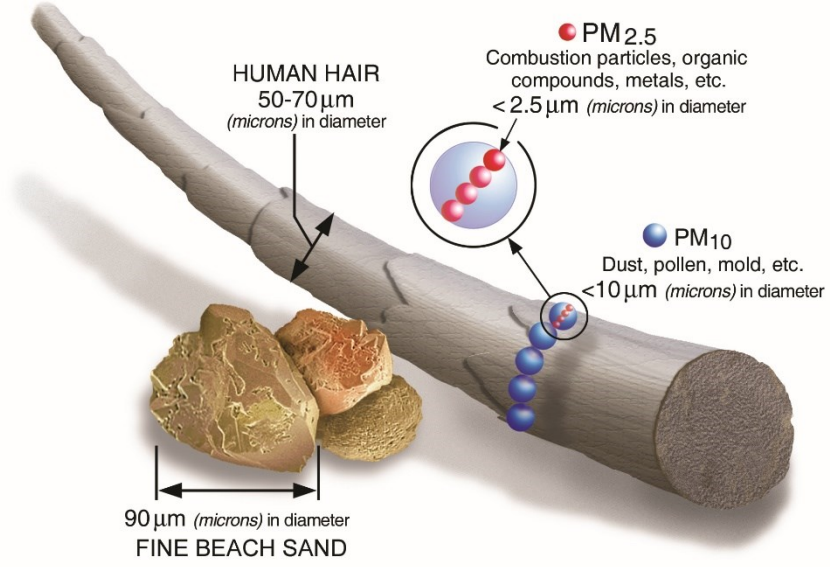
Çeşitli maddeler havayı kirletmekte ve bunların başında partikül madde (PM10 ve PM2.5), karbondioksit (CO₂), nitrojen dioksit (NO₂), ozon (O₃) ve kükürt dioksit (SO₂) gelmektedir (Glencross vd., 2020).

İç Mekan Hava Kalitesi (IAQ), bina sakinlerinin konforu ve sağlığı ile ilgili olduğu için bir bina içindeki hava kalitesini ifade etmektedir (van Tran vd., 2020). IAQ'nun iyileştirilmesi, solunum yolu hastalıklarına neden olan tehlikeli hava kirleticilerini azaltmakta ve üretkenliği önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca sağlıklı bir ortamın sağlanmasına katkıda bulunmaktadır (Alshuwaikhat & Abubakar, 2008).

Bu çalışma, PM2.5 ve CO₂ için gerçek zamanlı bir IAQ izleme sistemi geliştirilerek üniversite binasındaki IAQ analizine odaklanmaktadır.

3.2.1.1 Partikül Madde (PM)

Partikül Madde (PM), havada bulunan sıvı damlacıklar ve katı partiküllerin bir karışımı olarak tanımlanmaktadır (U.S. Environmental Protection Agency, 2020). PM birçok farklı boyuttan meydana gelmektedir. Kamyonlarda dizel, arabalarda benzin, ve enerji santrallerinde kullanılan kömür gibi fosil yakıtların yakılmasından küçük parçacıklar meydana gelmektedir. Daha büyük parçacıklar çoğunlukla topraktan gelmektedir. Atmosferdeki partiküllerin boyutu 0,01 ila 10 mikrometre (um) arasında değişmektedir (U.S. Environmental Protection Agency, 2019).



Şekil 32: PM Parçacıkları için Boyut Karşılaştırmaları
Kaynak: (U.S. Environmental Protection Agency, 2020)

Bu parçacıklar birçok şekil ve boyutta meydana gelmekte ve yüzlerce farklı kimyasaldan oluşabilmektedir. Parçacık boyutu, farklı boyutlardaki parçacıklara maruz kalma ile bağlantılı olan refah etkileri, farklı sağlık ve ölüm gibi bir PM için önemli bir husus olarak görülmekte ve farklı boyutlardaki partiküllere maruz kalma ile bağlantılı olduğu düşünülmektedir (Brook vd., 2010; Burnett vd., 2002; Pope & Dockery, 2006; Speizer vd., 1993).

ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından, hava kalitesini ölçmek için Hava Kalitesi İndeksi (AQI) adlı bir indeks oluşturulmuştur. AQI, partikül madde (PM2.5 ve PM10) Karbon Monoksit (CO) emisyonları, Azot Dioksit (NO₂), Kükürt Dioksit (SO₂) ve Ozon (O₃) ölçümüne dayanmaktadır. Dünyadaki istasyonların çoğu PM2.5i izlemektedir.

Birincil yıllık PM2.5 standardı 12 (µg/m³) ve 24 saatlik ince partikül standardı olan 35 µg/m³'ü korumaktadır (U.S. Environmental Protection Agency, 2012).

AQI altı kategoriye ayrılmıştır. Her kategorinin belirli bir rengi vardır ve farklı sağlık etkileri düzeyine karşılık gelmektedir.

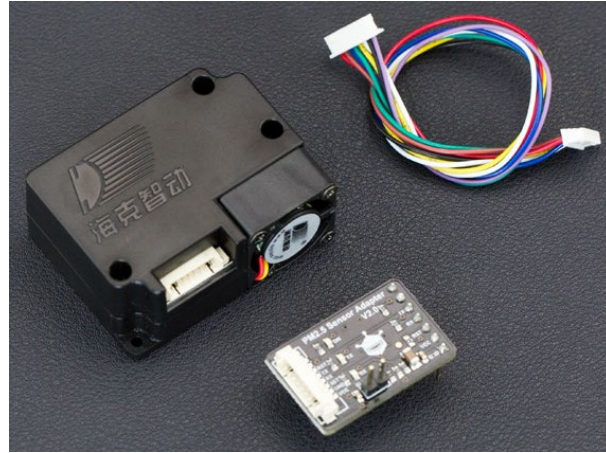
AQI Kategorileri	AQI Endeksleri Değerleri	PM2.5 (ug/m3)	Renk	Sağlık etkileri	Öneri
İyi	0 ila 50	0 ila 12	Yeşil	Hava kalitesi tatmin edici olarak kabul edilir ve hava kirliliği çok az risk oluşturur veya hiç risk oluşturmaz.	Hiçbiri.
İlman	51 ila 100	12.1 ila 35.4	Sarı	Hava kalitesi kabul edilebilir; bununla birlikte, hava kirliliğine karşı alışılmadık derecede hassas olan çok az sayıda insan için bazı kirleticiler için orta düzeyde sağlık endişesi olabilir.	Aktif çocuklar ve yetişkinler ve astım gibi solunum yolu hastalığı olan kişiler, uzun süreli dış mekan eforunu sınırlamalıdır.
Hassas Gruplar İçin Sağlıksız	101 ila 150	35,5 ila 55,4	Turuncu	Hassas grupların üyeleri sağlık etkileri yaşayabilir. Genel halkın etkilenmesi olası değildir.	Aktif çocuklar ve yetişkinler ve astım gibi solunum yolu hastalığı olan kişiler, uzun süreli dış mekan eforunu sınırlamalıdır.
Sağlıksız	151 ila 200	55,5 ila 150,4	Kırmızı	Herkes sağlık etkileri yaşamaya başlayabilir; hassas grupların üyeleri daha ciddi sağlık etkileri yaşayabilir.	Aktif çocuklar ve yetişkinler ve astım gibi solunum yolu hastalığı olan kişiler, açık havada uzun süreli efordan kaçınmalıdır; herkes, özellikle çocuklar, uzun süreli dış mekan eforunu sınırlamalıdır.
Çok sağlıksız	201 ila 300	150,5 ila 250,4	Mor	Acil durumların sağlık uyarıları. Tüm popülasyonun etkilenme olasılığı daha yüksektir.	Aktif çocuklar ve yetişkinler ve astım gibi solunum yolu hastalığı olan kişiler açık hava

					eforundan kaçınmalıdır; herkes, özellikle çocuklar, dış mekan eforunu sınırlamalıdır.
Tehlikeli	301 ila 500	255,5 ila 500,4	bordo	Sağlık uyarısı: herkes daha ciddi sağlık etkileri yaşayabilir.	Herkes tüm açık hava eforundan kaçınmalıdır.

Tablo 3: Hava Kalitesi İndeksi (AQI) ve PM2.5 Hava Kirliliği
Kaynak: (U.S. Environmental Protection Agency, 2014)

Üniversite binasındaki AQI, bir PM2.5 sensörü kullanılarak gerçek zamanlı bir AQI izleme sistemi geliştirilerek hesaplanmıştır.

PM2.5 hava kalitesi sensörleri, çapı 2,5 mikrometre veya daha küçük olan parçacıkları analiz edebilmektedir. Bu sensor sayesinde, havada asılı kalan parçacıkları yaymak için lazer saçılımı kullanılmakta, ardından saçılan ışığı toplayarak zamanla saçılan ışık değişiminin eğrisi elde edilmektedir.



Şekil 33: Partikül Madde (PM2.5) Hava Kalitesi Sensörü

3.2.1.2 Karbon Dioksit (CO₂)

Karbondioksit (CO₂) bir karbon ve iki oksijen atomundan oluşan renksiz, kokusuz, yanıcı olmayan bir gazdır. Havanın ana bileşeni ve Dünya'daki yaşam için ana karbon kaynağıdır. Yanan fosil yakıtlar, artan CO₂ konsantrasyonlarının birincil kaynağı ve

iklim değişikliği ve küresel ısınmanın birincil kaynağı olarak kabul edilmektedir (Shukla vd., 2022).

Kabul edilebilir dış havadaki CO₂ konsantrasyonları tipik olarak 300 ila 500 ppm arasındadır, ASHRAE iç mekan CO₂ seviyelerinin dış hava seviyelerinin 700 ppm üzerinde olmamasını önermektedir (ASHRAE, 2019). Dış mekan CO₂'inin 500 ppm civarında olduğu varsayılırsa, bu, ASHRAE'nin iç mekan CO₂ için maksimum 1200 ppm önerdiği anlamına gelmektedir.

Aşağıdaki tablo, 1000 ppm'den daha düşük bir günlük ortalama CO₂ konsantrasyonu elde etmek için yeterli bir dış hava sağlanması öneren İngiliz Standartlarına göre değişen CO₂ iç ortam ortamları için BS EN16798-1:2019 kılavuzunu göstermektedir.

CO ₂ Konsantrasyonu (ppm)	Sağlık etkileri	Öneri
1000 ppm'den az	İyi	Hiçbir eylem
1000 - 1200 ppm	Normal	Odanın havalandırmasını kontrol edin ve iyileştirin
1200 ppm'den fazla	Sağlıksız	Odanın havalandırmasını kontrol edin ve iyileştirin

Tablo 4: BS EN16798-1:2019 iç ortam havası için CO₂ konsantrasyonu kılavuz değerleri
Kaynak: (British Standards Institution, 2019a)

Üniversite binasındaki IAQ, MG-811 sensörü kullanılarak gerçek zamanlı bir IAQ izleme sistemi geliştirilerek hesaplama yapılmıştır.

MG-811 gaz sensörü, havadaki CO₂ gazlarını algılamada yüksek hassasiyete sahiptir.



Şekil 34: MG811 Karbon Dioksit (CO2) Sensörü

3.2.2 Termal Konfor

Isıl konfor, mekanın ısıl koşullarından kullanıcıların memnuniyeti olarak tanımlanabilmektedir (Fanger, 1970). İç ortamları değerlendirmek için deneysel veri setlerine dayalı olarak farklı ortamlar için çeşitli termal konfor modelleri geliştirilmiştir. Kapalı ortamlar için en yaygın kullanılan termal model, Tahmini Ortalama Oy adı verilen Fanger modelidir. Bu model, ARSHER 55–2016 ve ISO 7730-2005 gibi birçok uluslararası standart tarafından benimsenmiştir (Zhao vd., 2021).

3.2.2.1 Tahmini Ortalama Oy (PMV)

Tahmini Ortalama Oy (PMV), büyük bir grup kişinin oylarının ortalama değerini -3 ile +3 arasında değişen 7 noktalı termal duyu ölçeğinde, insan vücudu ısı dengesine dayalı olarak tahmin eden bir endekstir (Kumar & Kar, 2009). Vücuttaki iç ısı üretimi çevreye verilen ısı kaybına eşit olduğunda termal denge elde edilmiş olmaktadır. Ilımlı bir ortamda, insan termoregülatör sistemi, ısı dengesini korumak için cilt sıcaklığını ve ter salgısını otomatik olarak değiştirmeye çalışmaktadır.

Ölçek	Termal Algı
3	Çok soğuk
2	Soğuk
1	Biraz soğuk
0	Normal
-1	Biraz sıcak
-2	Sıcak
-3	Çok sıcak

Tablo 5: Termal algı ile PMV indeks ölçekleri
Kaynak: (ISO, 2005)

Bu PMV şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$PMV = ((0.303 \times \exp(-0.036 \times M) + 0.028)) \times \{M - 3.05 \times 10^{-3} \times (5733 - 6.99M - P_a) - 0.42 \times (M - 58.15) - 1.7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - P_a) - 0.0014 \times M \times (34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a)\}$$

Yer:

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl}\{3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_r + 273)^4 - (t_{cl} + 273)^4] + f_{cl} \times h_c (t_{cl} - t_a)\}$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} \times t_a)^{0.25} & \text{for } 2.38 \times |t_{cl} \times t_a|^{0.25} \geq 12.1\sqrt{v_a} \\ 12.1\sqrt{v_a} & \text{for } 2.38 \times |t_{cl} \times t_a|^{0.25} < 12.1\sqrt{v_a} \end{cases}$$

$$P_a = R_h \times 610.6 e^{\frac{17.2600 a}{273.3 + t_a}}$$

$$f_{cl} = 1 + (1.29 \times I_{cl})$$

Yer:

- M Metrekare başına watt cinsinden metabolik hızdır(W/m^2).
- W Metrekare başına watt cinsinden etkin mekanik güçtür(W/m^2).
- p_a Paskal cinsinden su buharı kısmi basıncıdır(Pa).
- f_{cl} Giysi yüzey alanı faktörüdür.
- I_{clt} Giysi yalıtımıdır, watt başına metrekare kelvin olarak($m^2 \cdot KM$).
- t_{cl} Santigrat derece cinsinden giysi yüzey sıcaklığıdır(°C).
- t_a Santigrat derece cinsinden hava sıcaklığıdır(°C).
- \tilde{t}_r Santigrat derece cinsinden ortalama radyan sıcaklıktır(°C).
- v_{ar} Metre/saniye cinsinden bağıl hava hızıdır(m/s).
- h_c Metrekare kelvin başına watt cinsinden konvektif ısı transfer katsayısıdır[$W/(m^2 \cdot K)$].
- R_h Bağıl nemdir (%).

Metabolik birim = 1met = 58,2 W/m²; 1 giyim birimi = 1clo = 0,155 m² · °CN.

Metabolik Hız (M) uzay aktivitesine göre hesaplanmıştır.

Aktivite	Metabolizma Hızı (M)	Metabolik Hız (M)
Uyuyor	40	0.7
Uzanmış	45	0,8
Oturmuş, sessiz	60	1
Ayakta, Rahat	70	1.2
Oturarak, okuyarak veya yazarak	60	1
Yürüme 1.2 m/s		150
Yazıyor	65	1.1
Doldurma, oturma	70	1.2
Doldurma, ayakta	80	1.4
Kaldırma/paketleme	120	2.1
Yemek pişirme	95 ila 115	1,6 ila 2,0
Ev temizliği	235 ila 280	2,0 ila 3,4
Dans, sosyal	140 ila 255	2.4 ila 4.4

Tablo 6: Tipik Görevler İçin Metabolizma Hızları
Kaynak: (ASHRAE, 2021)

Hesaplanan giysi yalıtım değerleri, yılın mevsimleri için tipik değerlere karşılık gelmektedir:

yaz ($0.5 I_{cl}$), kışlık giysiler ($1.0 I_{cl}$), ilkbahar ve kış ($0.75 I_{cl}$) (ASHRAE, 2004; Rupp vd., 2021).

İç hava hızı v_{ar} 0.15 m/s olarak ayarlanmıştır (ASHRAE, 2021).

Sıcaklık ve nem değerleri gerçek zamanlı olarak sensörden alınmıştır.

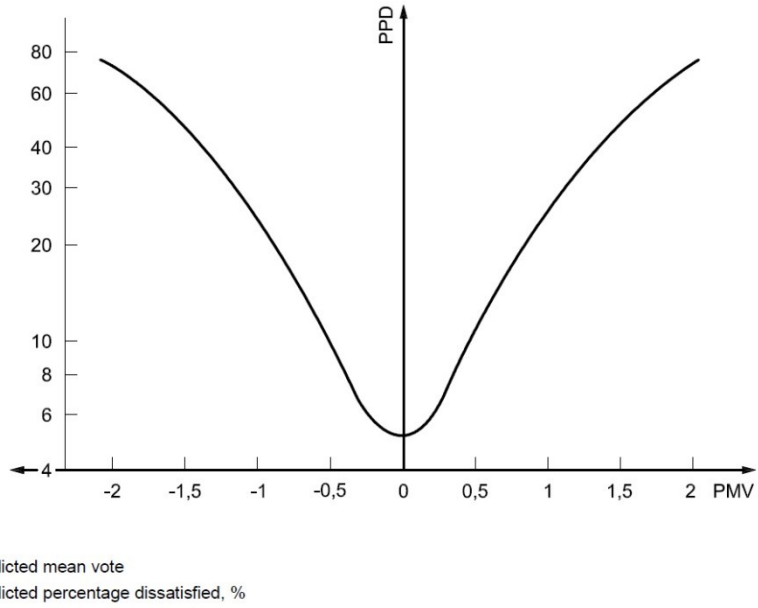
3.2.2.2 Tahmini Memnuniyetsizlik Yüzdesi (PPD)

PMV, aynı ortama maruz kalan bir grup insan için termal oyların ortalama değerini tahmin etmektedir, ancak bu, resmin tamamını göstermemektedir çünkü bireysel oylar bu ortalama değer etrafına dağılmıştır. Fanger, bu sorunu çözmek ve termal konfora nasıl ulaşılabileceğine dair daha bütünsel bir fikir edinmek için PMV'yi Tahmin Edilen Memnuniyetsizlik Yüzdesi (PPD) ile ilişkilendirmek için başka bir denklem geliştirmiştir.

PPD, büyük bir grup insan arasında uzayda rahatsızlık yaşayacağı tahmin edilen insanların yüzdesini tahmin etmektedir. Bir yolcunun vücudunun istenmeyen şekilde soğuması veya ısınması, rahatsızlığın ana faktörlerindedir. Termal konfor, %80 veya daha fazla kullanıcı memnuniyet oranına dayalı olarak elde edilebilmektedir. Bu, termal konforu sağlamak için PPD değerinin %20'den az olması gerektiği anlamına gelmektedir (ASHRAE, 2004; ISO, 2005).

Bu PPD şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0,03353 \times PMV^4 - 0,2179 \times PMV^2)$$



Şekil 35: PMV'nin fonksiyonu olarak PPD
 Kaynak:(ISO, 2005)

Bu çalışma, bir BME280 sensörü kullanılarak gerçek zamanlı bir PMV ve PPD izleme sistemi geliştirilerek üniversite binasındaki kullanıcıların Termal konforunun analizine odaklanmaktadır.

BME280 sensörü, sıcaklık, bağıl nem ve barometrik basınca sahip bir ortam sensörüdür. Bu sensör, sıcaklığı $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ doğrulukla, bağıl nemi $\pm\%3$ doğrulukla ve barometrik basıncı ± 1 hPa mutlak doğrulukla ölçmek için Bosch'un en doğru sensörlerinden biri olarak kabul edildiğinden, her türlü iç mekan ortam algılaması için mükemmel olarak kabul edilmektedir.



Şekil 36: BME280 Sıcaklık, Nem ve Basınç Sensörü

3.2.3 Görsel Konfor

Görsel konfor, aydınlatma miktarı, ışığın homojenliği, renk sıcaklığı ve kamaşma olup olmaması gibi bir dizi çevresel faktörle ifade edilmektedir. Yaş gibi insan faktörlerine ek olarak, yaş arttıkça görme yeteneği azalmaktadır (Andersen vd., 2008; DiLaura vd., 2018; Silvester & Konstantinou, 2010).

Aydınlık, bir yüzeye düşen veya aydınlatan ışık miktarı olarak tanımlanmakta ve lüks olarak ölçülmektedir. Farklı aydınlatma lüksü, bir binada kullanılan alanın farklı bina türleri ile ilgilidir (Carlucci vd., 2015). Eğitim binalarında, Avrupa Standardı UNE EN 12464-1:2022, sınıflar ve konferans salonları için 500 lüks önerilmiştir (European Standard, 2022).

İç mekan, görev veya aktivite türü	Sürdürülen Aydınlatma (Em) Lüks	Birleşik Derecesi (UGR)	Parlama sınırı	Renk Oluşturma İndeksleri (Ra)
Sınıflar, eğitim odaları	300	19		80
Sınıf (veya akşam sınıfları ve yetişkin eğitimi)	500	19		80
Konferans salonu	500	19		80
kara tahta	500	19		80
Gösteri tablosu	500	19		80
Sanat odaları	500	19		80
Sanat okullarında sanat odaları	750	19		90
Teknik çizim odaları	750	16		80
Pratik odalar ve laboratuvarlar	500	19		80
El işi odaları	500	19		80
öğretim atölyesi	500	19		80
Müzik uygulama odaları	300	19		80

Bilgisayar uygulama odaları (menüyle yönlendirilir)	300	19	80
Dil laboratuvarı	300	19	80
Hazırlık odaları ve atölyeler	500	22	80
Giriş holleri	200	22	80
Sirkülasyon alanları, koridorlar	100	25	80
Merdivenler	150	25	80
Öğrenci ortak salonları ve toplantı salonları	200	22	80
Öğretmen odaları	300	19	80
Kütüphane: kitaplık	200	19	80
Kütüphane: okuma alanları	500	19	80
Öğretim materyalleri için stok odaları	100	25	80
Spor salonları, spor salonları, yüzme havuzları (genel kullanım)	300	22	80
Okul kantinleri	200	22	80
Mutfak	500	22	80

Tablo 7: UNE EN 12464-1:2022 Eğitim binaları için iç mekanlar, görevler ve faaliyetler için aydınlatma gereksinimleri
Kaynak: (European Standard, 2022)

Bu çalışma, bir TSL2591 sensörü kullanılarak gerçek zamanlı bir Aydınlık izleme sistemi geliştirilerek üniversite binasındaki kullanıcıların Görsel konforunun analizine odaklanmaktadır.

TSL2591, 188 uLux ila 88.000 Lux arasındaki ışık aralıklarını algılayabilen yüksek dinamik aralıklı bir dijital ışık sensördür. Sensör ayrıca 600.000.000:1 gibi devasa bir dinamik aralığa sahiptir.



Şekil 37: TSL2591 Işık Sensörü

3.2.4 Akustik Konfor

Akustik konfor, bir ortamdaki akustik koşullardan memnuniyet durumu olarak tanımlanmaktadır (C. Wang vd., 2015). Ancak akustik konfor öznel ve aynı fiziksel özelliklere sahip sesler çeşitli kişiler tarafından farklı algılanabilmektedir (Azar vd., 2020).

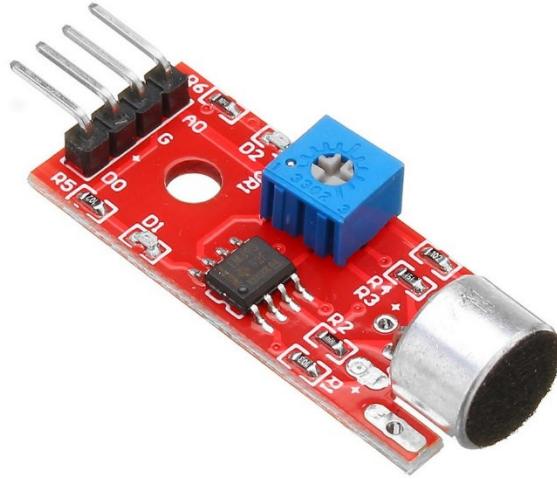
Farklı ses basınç seviyesinin, farklı bina tipleri ve bir binada kullanılan alan tipi ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Eğitim binalarında, Avrupa Standardı EN 15251:2007 tarafından, sınıflar için 30 ila 40 dB arasındaki ses basınç seviyeleri için iç mekan sistem gürültü kriterlerini önerilmiştir (European Standard, 2007).

Alan türü	Ses Basıncı Seviyesi (dB)	
	Tipik Aralık	Varsayılan Tasarım
Sınıflar	30 ila 40	35
Koridorlar	35 ila 50	40
Spor salonları	35 ila 45	40
Öğretmen odaları	30 ila 40	35
Tuvaletler	40 ila 50	45
Vestiyer	40 ila 50	45

Tablo 8: EN 15251:2007 Eğitim binaları için ses basınç seviyesi iç mekan sistem gürültü kriterleri
Kaynak: (European Standard, 2007)

Bu çalışma, KY-037 ses sensörünü kullanılarak gerçek zamanlı bir ses basınç seviyesi izleme sistemi geliştirilerek üniversite binasında yaşayanların akustik konforunun analizine odaklanmaktadır. İç mekan ses basınç seviyesi 60 dB'ye (A) ulaştığında bir alarm gönderilmektedir.

KY-037, 0 ila 115 dB arasındaki ses basınç seviyelerini algılamak için hassas bir kapasitans mikrofondan oluşan bir ses sensörü olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 38: KY-037 Ses Sensörü

3.3 Veri İşleme Katmanı (IoT Bulut Platformu)

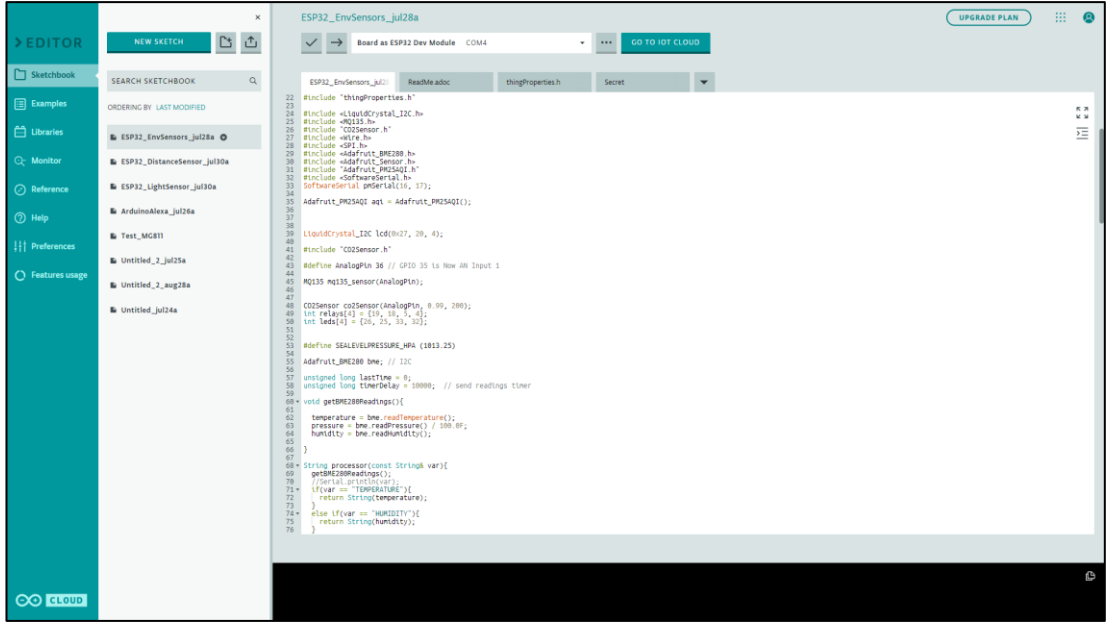
Bu bölümde, kullanılacak Arduino IoT Bulutu olan bulut tabanlı platformu tanıtılmaktadır. Arduino IoT Cloud, kullanıcı dostu bir arayüz ve konfigürasyon, kod yazma, yükleme ve görselleştirme için hepsi bir arada bir çözümle IoT projeleri oluşturmak, dağıtmak ve izlemek için kullanılabilir bir çevrimiçi platformdur.

Aşağıda Arduino IoT Cloud özelliklerinin bir listesi bulunmaktadır:

- **Veri İzleme:** Arduino'nun sensör değerlerini bir gösterge panosu aracılığıyla izlemektedir.
- **Değişken Senkronizasyon:** Cihazlar arasında değişkenlerin senkronizasyonuna izin vererek, cihazlar arasında minimum kodlama ile iletişimi mümkün kılmaktadır.
- **Zamanlayıcı:** İşleri belirli bir süre (saniye, dakika, saat) açıp kapatacak şekilde planlamaktadır.
- **Havadan (OTA) Yükleme:** Bilgisayara bağlı olmayan cihazlara kod yüklemektedir.
- **IFTTT** gibi başka bir hizmetle bütünleştirmektedir.
- **Alexa Desteği:** Bu, projenin Amazon Alexa ses entegrasyonu ile kontrol edilmesini sağlamaktadır.
- **Yönlü Grafikler Paylaşımı:** Proje verilerini dünyadaki diğer insanlarla paylaşılmasına olanak sağlamaktadır.

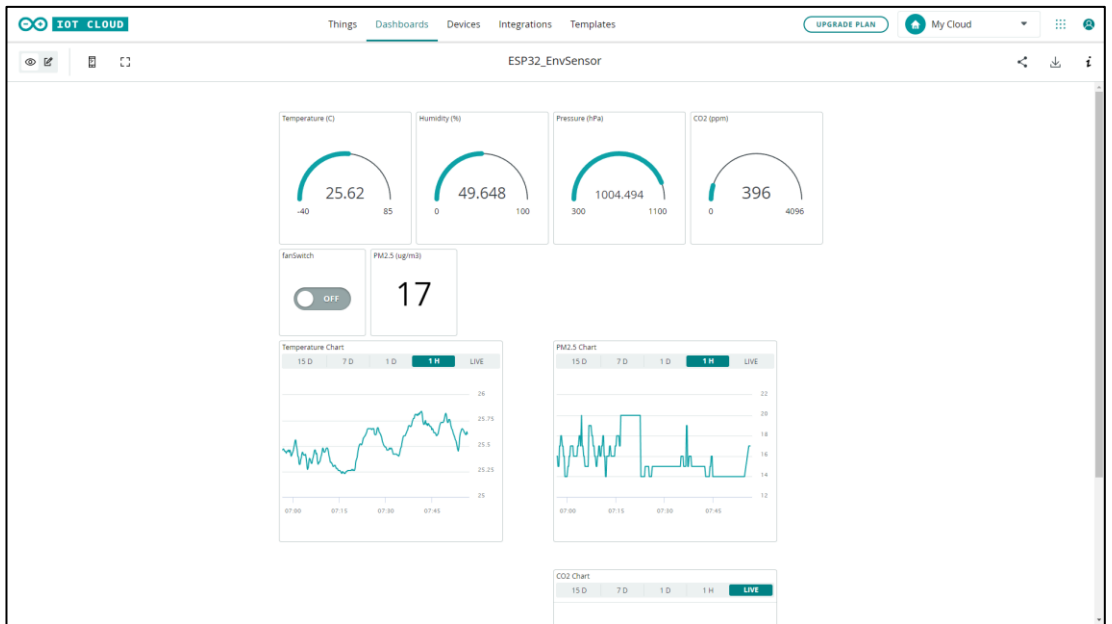
Arduino IoT Cloud'u kullanmak için bulut uyumlu bir kart gereklidir. Arduino IoT Cloud, resmi bir Arduino kartı veya ESP32 ve ESP8266 mikro denetleyicilerine dayalı bir kart ile kullanılabilir.

Arduino IoT Cloud IDE programlama dili, özel yöntemler ve işlevler eklenmiş C++ diline dayanmaktadır. IDE, C++ kodunu ESP32 SoC mikrodenetleyicisi kullanılan Assembly dilinde derlemektedir.



Şekil 39: Arduino IoT Bulut IDE Web Düzenleyicisi

Arduino IoT Bulut Panoları, projenin ihtiyaçlarına göre farklı kurulumlarla özelleştirilebilen, bulut üzerinden ESP32 SoC mikrodenetleyicileri ile etkileşim kurmak için görsel kullanıcı arayüzleridir.

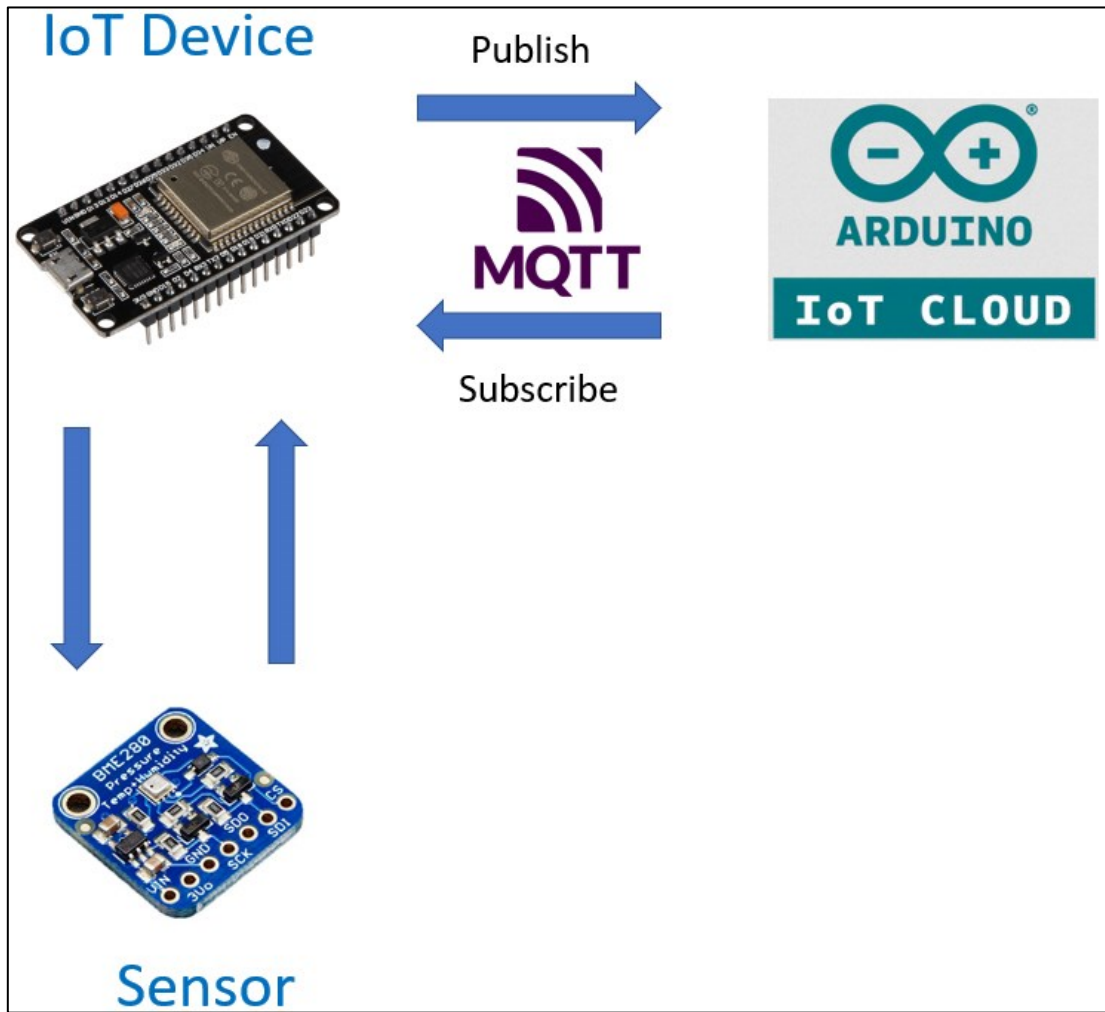


Şekil 40: Arduino IoT Bulut IDE Panoları

Arduino IoT Cloud ile IoT cihazı arasında sensör verilerinin değiş tokuşu için dinamik bir entegrasyon işleml oluşturma işleml, Message Queuing Telemetry Taşıma (MQTT) protokolü kullanılarak yapılmıştır. MQTT, küçük bir kod alanı ve minimum ağ bant genişliği ile IoT cihazları gibi uzak cihazları bağlamak için TCP/IP soketleri üzerinden çalışan yayınl/abone ol ağ protokolü olarak tasarlanmış hafif bir mesajlaşma protokolüdür.

Değişim verileri iş akışı aşığıdaki gibidir:

- IoT cihazı (ESP32), bağlı sensörlerden gelen verileri okumaktadır.
- IoT cihazı (ESP32), MQTT protokolünü kullanarak sensör okumalarını Arduino IoT Cloud'a yayınlamaktadır.
- Sensör okumaları Arduino IoT Cloud Dashboard'da görüntülenmektedir.



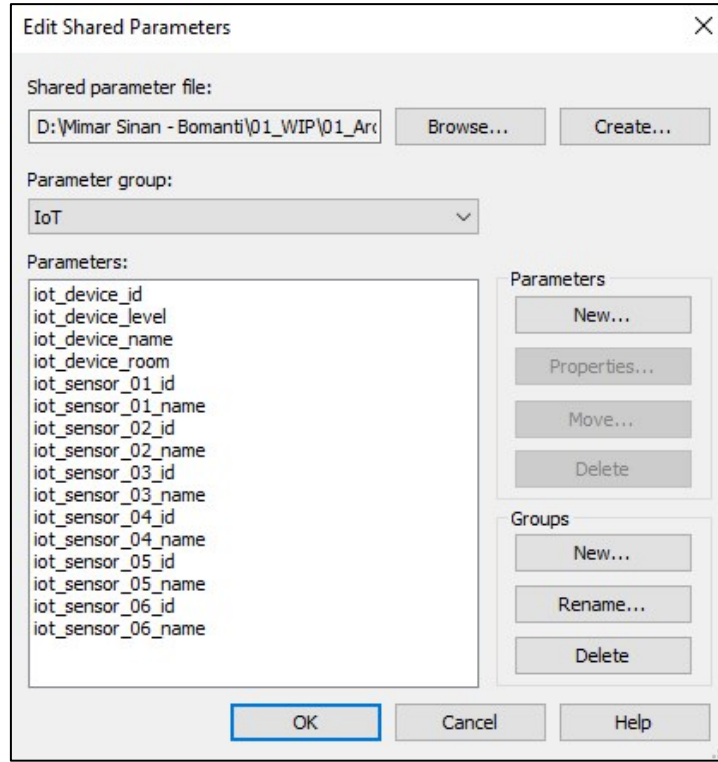
Şekil 41: Veri İşleme Katmanı İş Akışı

3.4 Entegrasyon Katmanı

BIM modeli ile IoT sensör verileri arasında dinamik bir entegrasyon süreci oluşturma Revit, Arduino IoT Cloud ve Unreal Engine içerisinde yapılmıştır.

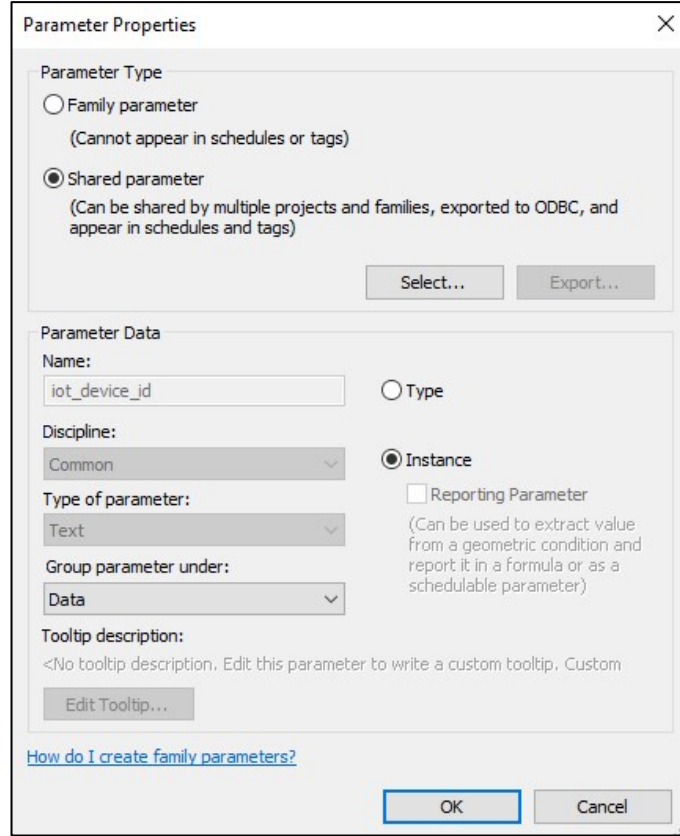
İlk adım, sensör cihazlarının özelliklerini, Arduino IoT Bulut veritabanından BIM modelini ve sensör verilerini Revit'e entegre etmek için benzersiz bir tanımlayıcı kullanarak veri tabanından ve BIM modeli sensör ailesinden gelen verilerle eşleştirmektir.

BIM modelinde IoT cihazı ve sensör verilerini temsil etmek için "IoT" adlı paylaşılan parametre grubu oluşturulmuştur.



Şekil 42: Revit'te IoT Paylaşılan Parametreler Grubu


IoT parametreleri, IoT cihazına veya sensör tipine göre ayrı ayrı değiştirilebilmesi için örnek parametrelerine ayarlanmıştır.




Şekil 43: Revit'te IoT Örnek Parametreleri

“iot_device_id ” parametresi, çip üzerinde ESP32 sistem mikro denetleyicisini temsil etmektedir.

“iot_sensor_0x_id” parametresi sensör verilerini temsil etmektedir. Bu parametreler Arduino IoT Cloud'dan alınmıştır.




ESP32_EnvSensor


ID: 3a84146c-4537-416d-b306-... 

Type: ESP32 Dev Module

Status: ● Online



Change



Detach


temperature

Declaration
CloudTemperatureSensor temperature

Type
Temperature sensor (°C)

Variable Permission
Read Only

Send Values
Timed Every: 10 s


ID
cab84b7-48ce-444b-b858-230cb0658cd9 

Last Value
25.43

Last Update
06 Oct 2022 18:34:13

Şekil 44: Arduino IoT Cloud'da Cihaz Kimliği ve Adı (Sol), Sıcaklık Sensörü Kimliği ve Adı (Sağ)

Properties X

 IoT Device
ESP32_EnvSensors

Communication Devices (1) Edit Type

Data	
iot_device_id	3a84146c-4537-416d-b306-527a84ddc3ce
iot_device_name	ESP32_EnvSensors
iot_device_level	06
iot_device_room	Informatics Laboratory
iot_sensor_01_id	cab84b7-48ce-444b-b858-230cb0658cd9
iot_sensor_01_name	BME280 - Temperature
iot_sensor_02_id	bcf1825d-f87f-4761-bcc7-d2831bc26b68
iot_sensor_02_name	BME280 - Humidity
iot_sensor_03_id	c8c2c943-451a-4d2c-af43-2463217ee5ba
iot_sensor_03_name	BME280 - Pressure
iot_sensor_04_id	bcc09745-9f30-44b3-9cd8-9c8727f33cba
iot_sensor_04_name	PM2.5
iot_sensor_05_id	b201224d-90dc-4388-9162-7f17327e72f7
iot_sensor_05_name	CO2
iot_sensor_06_id	
iot_sensor_06_name	
COBie	<input checked="" type="checkbox"/>
COBie.ExternalIdentifier	
COBie.CreatedBy	moutaman.sabbagh@gmail.com
COBie.CreatedOn	2022-09-01T09:30:00
COBie.Component.Name	ESP32_EnvSensor
COBie.Component.Space	Informatics Laboratory
COBie.Component.Description	ESP32 system-on-chip (SoC) microcontro...
COBie.Component.SerialNumber	2AC7Z-ESPWROOM32
COBie.Component.InstallationDate	2022-10-01T10:30:00
COBie.Component.WarrantyStartDate	2022-10-01T10:30:00

[Properties help](#) Apply

Şekil 45: Revit'te Cihaz ve Sensör Bilgilerini Eşleştirme

İkinci adım, Revit BIM modelini Unreal Engine'e aktarmaktır. Bu, 3B geometriyi ve IoT cihaz verileri, sensör verileri, COBie verileri ve Sınıflandırma Yönetim Sistemleri verileri gibi grafiksel olmayan bilgileri içermektedir.

▼ Device Info	
Device ID	eaedeaa-d108-4e7f-a498-0c92c874c39a
▼ Property ID	4 Array elements + ⌵
Index [0]	cabc84b7-48ce-444b-b858-230cb0658cd9 ⌵
Index [1]	bcf1825d-f87f-4761-bcc7-d2831bc26b68 ⌵
Index [2]	c8c2c943-451a-4d2c-af43-2463217ee5ba ⌵
Index [3]	ba8d6c9c-455b-4293-b5b6-d64faad50fa4 ⌵
Thing ID	
ESensor Type	Thermal ⌵
▼ Property Data Fields	
Propert Field Name 01	Temperature (C) ⌵
Propert Field Name 02	Humidity (%) ⌵
Propert Field Name 03	Pressure (hPa) ⌵
Propert Field Name 04	PMV ⌵

Şekil 46: Unreal Engin'de Cihaz ve Sensör Bilgilerini Eşleştirme

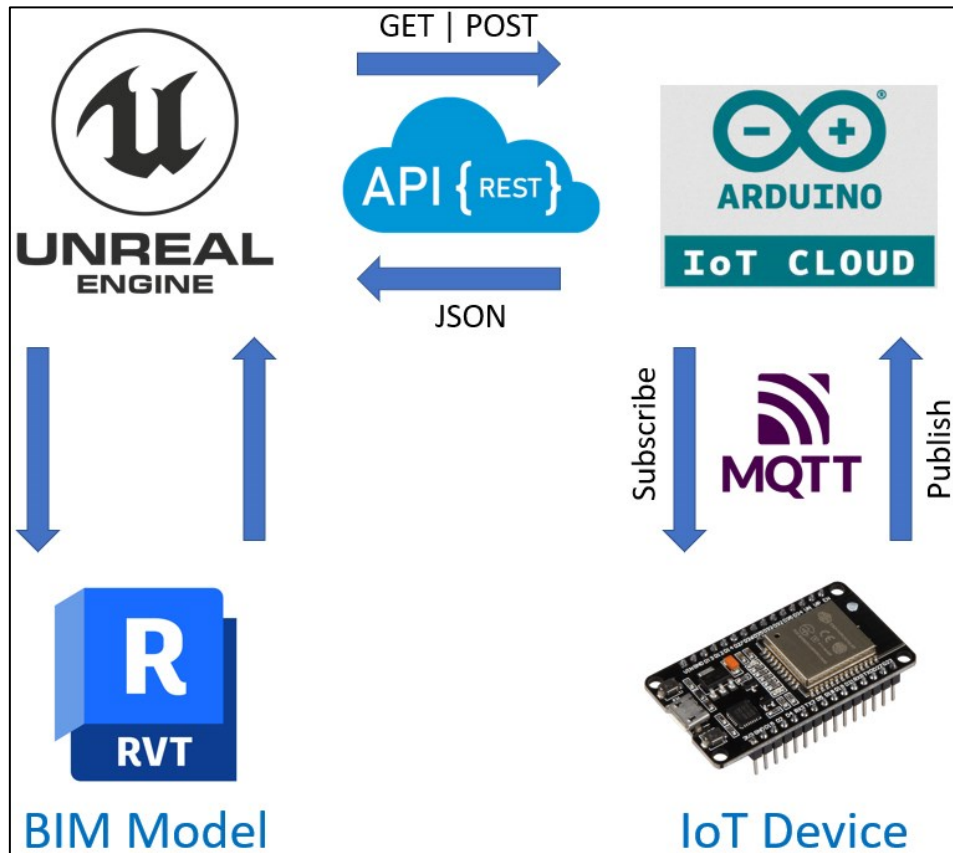
U Details x	
Mechanical_Equipment_Air_Conditioning_-_TOSHIBA_RAV-RM561FT_Colonna_VRF-036-056	
Search	
General Actor LOD Misc Physics Rendering Streaming All	
Type_Classification_MasterFormat_Description	Room Air-Conditioners ⌵
Type_Classification_MasterFormat_Number	23 81 16 ⌵
Type_Classification_OmniClass_23_Description	Air Conditioners ⌵
Type_Classification_OmniClass_23_Number	23-33 39 11 ⌵
Type_Classification_Uniclass_Pr_Description	Room air conditioning units ⌵
Type_Classification_Uniclass_Pr_Number	Pr_70_65_03_72 ⌵
Type_Classification_UniFormat_2010_Description	Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) ⌵
Type_Classification_UniFormat_2010_Number	D30 ⌵
Type_COBie_Type_AssetType	Fixed ⌵
Type_COBie_Type_Category	Pr_70_65_03_72 : Room air conditioning units ⌵
Type_COBie_Type_Color	White ⌵
Type_COBie_Type_CreatedBy	moutaman.sabbagh@gmail.com ⌵
Type_COBie_Type_CreatedOn	2022-09-01T09:30:00 ⌵
Type_COBie_Type_Description	TOSHIBA RAV-RM561FT standing unit air conditioner
Type_COBie_Type_Manufacturer	TOSHIBA ⌵
Type_COBie_Type_ModelNumber	RAV-RM561FT ⌵
Type_COBie_Type_Name	Air Conditioning - TOSHIBA RAV-RM561FT ⌵
Type_COBie_Type_Size	390D x 600W x 1750H mm ⌵
Type_COBie_Type_WarrantyDurationLabor	2 ⌵
Type_COBie_Type_WarrantyDurationUnit	Year ⌵
Type_COBie_Type_WarrantyGuarantorLabor	technical.enquiries@toshiba-ac.com ⌵

Şekil 47: COBie Verileri ve Yönetim Sınıflandırma Sistemleri Verilerini Eşleştirme

Üçüncü adım, Temsilci Durum Aktarımı (REST) API'sini kullanarak Arduino IoT bulutu ile Unreal Engine arasında veri alışverişi yapmaktır. REST API, GET veya POST isteğini kullanarak HTTP üzerinden iletişim kuran bir istek/yanıt modeli olarak tasarlanmış temsili bir durum aktarımı mimari stilidir.

Veri entegrasyonu iş akışı aşağıdaki gibidir:

- Unreal Engine, Revit BIM modelini içe aktarmaktadır. Bu, 3B geometriyi ve IoT cihaz kimlikleri ve sensör kimlikleri gibi grafiksel olmayan bilgileri içermektedir.
- IoT cihazı (ESP32), MQTT protokolünü kullanarak sensör okumalarını Arduino IoT Cloud'a yayınlamaktadır.
- Unreal Engine, Arduino IoT'den sensör verilerini istemek için REST API kullanarak GET veya POST isteği göndermektedir.
- Arduino IoT, istenen sensör verilerini JSON formatında REST API kullanarak Unreal Engine'e göndermektedir.



Şekil 48: Veri Entegrasyon Katmanı İş Akışı

3.5 Görselleştirme ve Analiz Katmanı (Unreal Engine)

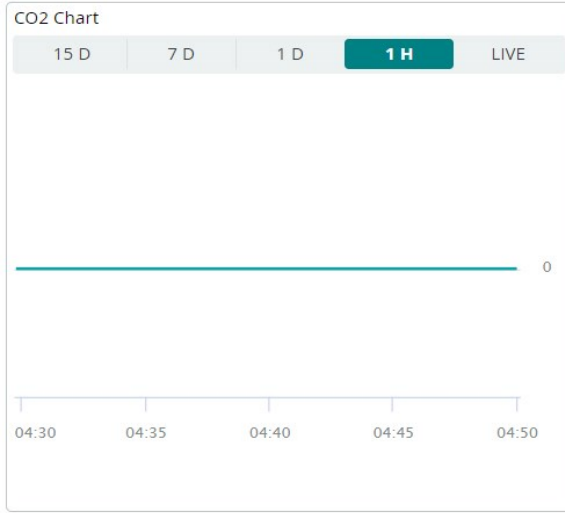
Veri entegrasyonu oluşturma sürecinden geçtikten sonra, bir sonraki bölüm, BIM modeli ve sensör verilerini birleştiren çıktı olan veri görselleştirmesidir, UI bileşenleri kullanılarak Unreal Engine'de görselleştirilmektedir. Bu, kullanıcının uygulama ile etkileşime girdiği yer olarak belirtilmektedir.



Şekil 49: Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Bomonti Yerleşkesindeki Bilişim Laboratuvarı için Dijital İkizler modeli (Birinci Şahıs Bakış Görüntüsü)

Doğru verilerin Dijital ikiz'e başarılı bir şekilde entegre edilip edilmediğini doğrulamak önemlidir. Görselleştirilen verilerin geçerliliğini kontrol etmek için, veri tabanı ile Unreal Engine'deki görselleştirilmiş veriler arasındaki verileri karşılaştırmak gerekmektedir. Bu aynı zamanda belirli bir süre veri toplamayan cihazları tespit ederek IoT cihazlarının düzgün çalışıp çalışmadığını kontrol etmeye de yardımcı olmaktadır.

Bu uygulamada, bazı sensör cihazları veri değeri döndürmediği ve aynı zaman diliminde veri tabanı ile karşılaştırıldığında, bu sensörlerin de verisi olmadığı için bu doğrulamayı yapmak kolay olmaktadır.



co2Value

Declaration

float co2Value

Type

Floating point number

Variable Permission

Read Only

Send Values

Timed Every: 10 s

ID

b201224d-90dc-4388-9162-7f17327e72f7 

Last Value

0

Last Update

07 Oct 2022 04:50:26

Şekil 50: CO2 Sensörü Arduino IoT Cloud'a Veri Göndermiyor

“4.2 Veri Toplama ve İzleme Katmanı”nda detaylı olarak tartışılan izlenen parametreler için sensör veri sonuçlarını standartlar ve Rahat değerlerle karşılaştırmak için Unreal Engine UI'ye karar verme panosu eklenmiştir.

IoT akıllı sensörlerine ve veri analizine dayanan bu dijital ikiz platform, herhangi bir sensör verisi aşırı veya sağlıksız olarak kabul edilen bir değer olduğunda, tesis yöneticisinin bunu yapmasına ve sorunu çözmek için hemen harekete geçmesine yardımcı olmak için Unreal Engine UI'ye dayalı bir uyarı sistemi sağlamaktadır.

3.5.1 İç Mekan Hava Kalitesi (IAQ)

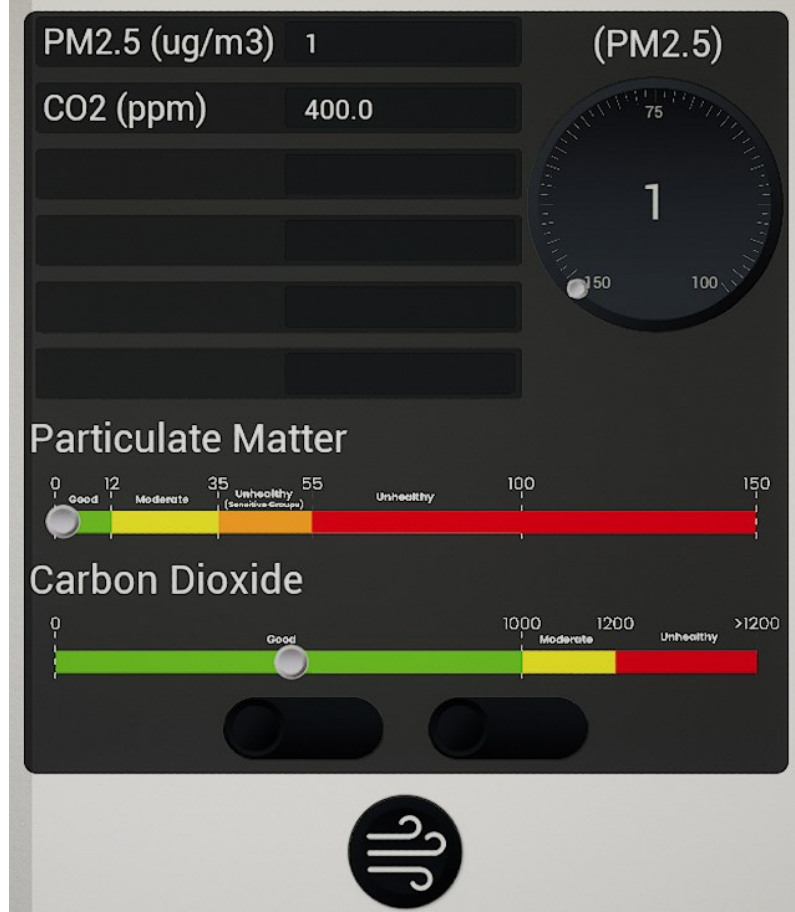
İç Mekan Hava Kalitesi için gösterge paneli parametreleri aşağıdaki gibi atanmıştır:

PM2.5 (ug/m3)	Kategori	Renk
0 ila 12	İyi	Yeşil
12 ila 35	Normal	Sarı
35 ila 55	Sağlıksız (Hassas Gruplar)	Turuncu
55 ila 150	Sağlıksız	Kırmızı

Tablo 9: Yönlü Grafikler - Partikül Madde (PM2.5)

CO2 (ppm)	Kategori	Renk
0 ila 1000	İyi	Yeşil
1000 ila 1200	Normal	Sarı
1200'ün üzerinde	Sağlıksız	Kırmızı

Tablo 10: Yönlü Grafikler - Karbon Dioksit (CO2)



Şekil 51: Unreal Engine Dashboard - İç Mekan Hava Kalitesi

3.5.2 Termal Konfor

Termal Konfor için gösterge paneli parametreleri aşağıdaki gibi atanmıştır:

Ölçek	Termal Algı	Renk
-3	Çok soğuk	Mavi
-2	Soğuk	Açık mavi
-1	Biraz soğuk	Açık yeşil
0	Normal	Yeşil
+1	Biraz sıcak	Sarı
+2	Sıcak	Turuncu
+3	Çok sıcak	Kırmızı

Tablo 11: Yönlü Grafikler - Tahmini Ortalama Oy (PMV)



Şekil 52: Unreal Engine Dashboard - Termal Konfor

3.5.3 Görsel Konfor

Visual Comfort için gösterge paneli parametreleri aşağıdaki gibi atanmıştır:

Aydınlık (Lüks)	Kategori	Renk
0 ila 200	Düşük	Mavi
200 ila 400	İlman	Sarı
400 ila 600	İyi	Yeşil
600 ila 800	Yüksek	Turuncu
800'ün üzerinde	Aşırı	Kırmızı

Tablo 12: Yönlü Grafikler - Aydınlık (lux)

UV Endeksi	Kategori	Renk
0'dan 2'ye	Düşük	Yeşil
3 ila 5	İlman	Sarı
6 ila 7	Yüksek	Turuncu
8 ila 10	Çok yüksek	Kırmızı
11'in üstünde	Aşırı	Mor

Tablo 13: Yönlü Grafikler - UV İndeksi



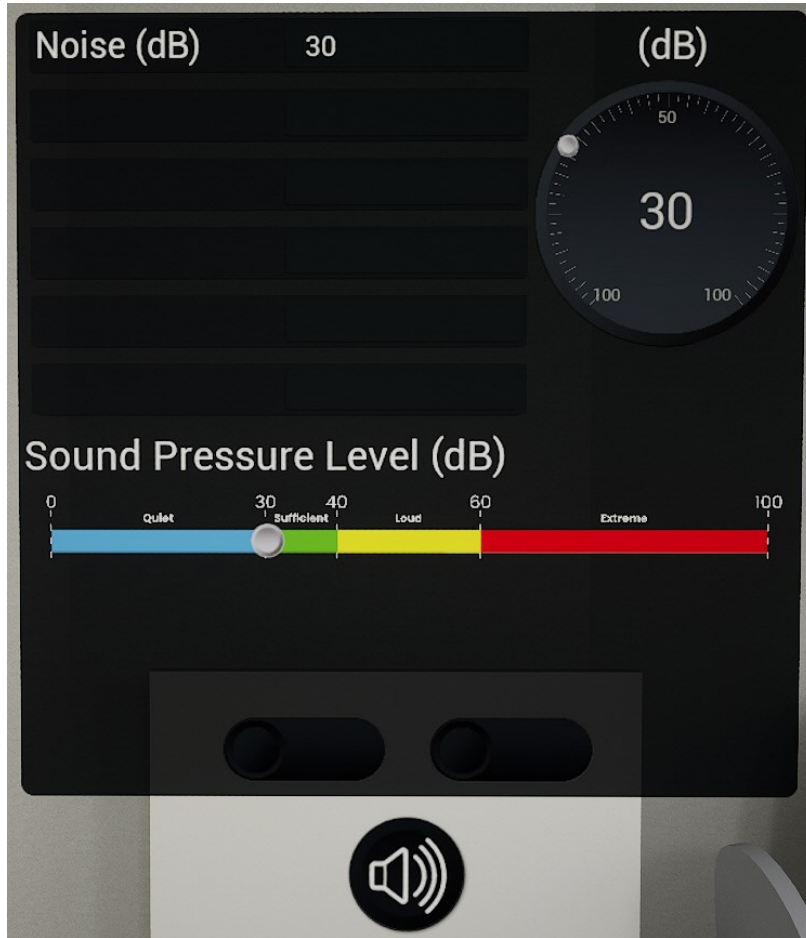
Şekil 53: Unreal Engine Dashboard - Görsel Konfor

3.5.4 Akustik Konfor

Acoustic Comfort için gösterge paneli parametreleri aşağıdaki gibi atanmıştır:

Gürültü (dB)	Kategori	Renk
0 ila 30	Sessizlik	Mavi
30 ila 40	Yeterli	Yeşil
40 ila 60	Yüksek sesle	Sarı
60'ın üzerinde	Aşırı	Kırmızı

Tablo 14: Yönlü Grafikler - Ses Basıncı Seviyesi (dB)
Kaynak: (European Standard, 2022)



Şekil 54: Unreal Engine Dashboard - Akustik Konfor

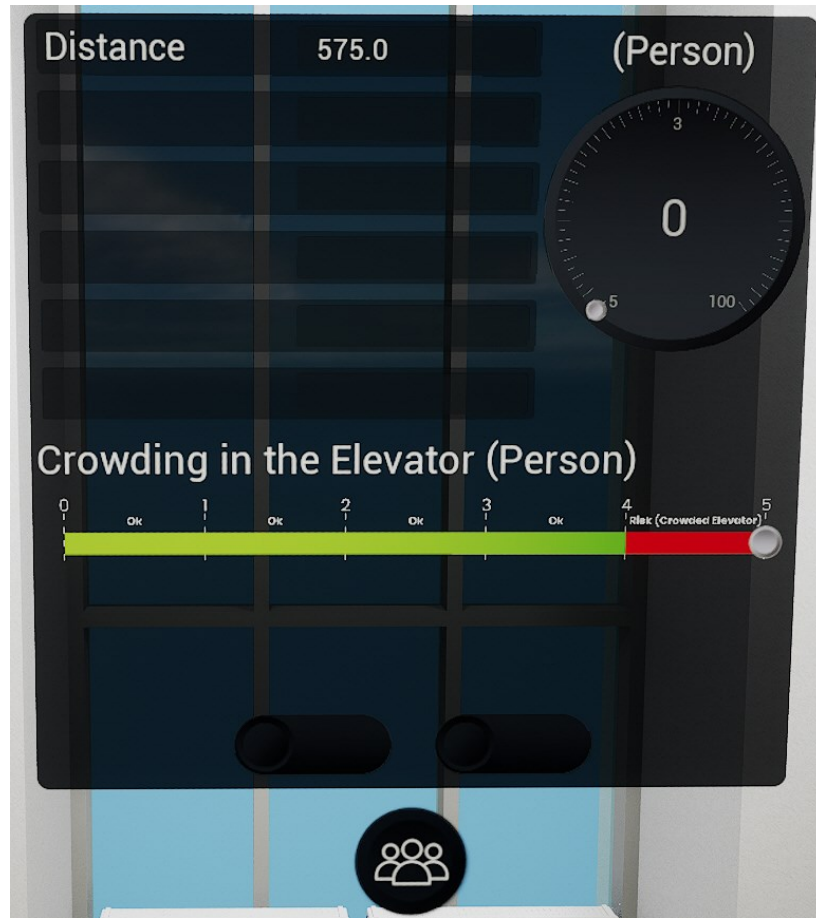
3.5.5 Asansörde Sosyal Mesafe

VL53L1X Time-of-Flight (ToF) sensörü kullanılmıştır. Asansörde 4 veya daha fazla kişinin bulunduğu bir Uyarı Sistemi olarak tanımlanmaktadır.

Asansörde Sosyal Mesafe için gösterge paneli parametreleri aşağıdaki gibi atanmıştır:

Kişi	Kategori	Renk
0'dan 1'e	TAMAM	Yeşil
1 ila 2	TAMAM	Yeşil
2 ila 3	TAMAM	Yeşil
3 ila 4	TAMAM	Yeşil
4'ün üstünde	Risk (Kalabalık Asansör)	Kırmızı

Tablo 15: Asansörde Kalabalık (Kişi)



Şekil 55: Unreal Engine Dashboard - Asansörde Sosyal Mesafe

3.5.6 Sesli Asistanı Kullanan Akıllı Tesis Yönetimi

Amazon'un bulut tabanlı ses hizmeti olan Alexa Voice kullanımı Dijital ikiz ve gerçeklikte iç ortamın izlenmesi ve kontrol edilmesi için sensörlerle iletişim kurmak için ses yardımı uygulamasıyla desteklenen bulut ve IoT sensörleri arasında iki yönlü entegrasyon geliştirilmiştir.

Dijital ikiz ve fiziksel modelde aşağıdaki komutları yapabilmektedir:

- Klimayı açın/kapatın
- Odadaki ışıkları açın/kapatın.
- Işıkların rengini değiştirin.
- Sensörlerin veri değerleri hakkında gerçek zamanlı bilgi verin. (Örneğin, odanın sıcaklığı)

Bu komutlar, doğrudan ESP32 tarafından çalıştırılabildiği için 5V fan ve LED ışık kullanılarak test edilmiştir. Bununla birlikte, bu komutlar 220V fan veya LED ışık üzerinde de test edilebilmekte, ancak elektrikle çalışan bir anahtar olan röle modülü gibi, akımın geçmesine izin verip vermemeye karar vererek açılıp kapatılabilen bir röle modülü gibi ekstra ekipman gerektirmektedir. Röle modülü, ESP32'yi kullanarak 220V yüksek voltajı kontrol edebilmektedir.

Name ↓	Last Value	Last Update
lightSwitch CloudSwitch lightSwitch;	true	05 Oct 2022 20:26:07
luxValue float luxValue;	0	05 Oct 2022 20:20:42
rgbLight CloudColoredLight rgbLight;	{"bri": "100", "hue": "0...	05 Oct 2022 20:20:42
testBool bool testBool;	true	05 Oct 2022 20:20:42
testFloat float testFloat;	0.761	05 Oct 2022 20:41:10
testString String testString;	0.836512	05 Oct 2022 20:20:42

Alexa_LightSensor

ID: eaaedeea-d108-4e7f-a498-...

Type: ESP32 Dev Module

Status: ● Offline

Change Detach

Network

Wi-Fi Name: COVID-...

Şekil 56: Arduino IoT Cloud – Alexa Voice AI Cihazı

Son olarak Unreal Engine Digital Twin Projesi PC'de çalışabilen Windows uygulamasında yayınlanmıştır.

4. SONUÇ

BIM'i bulut, yapay zeka ve IoT tesis yönetim sistemleriyle entegre etmek, tesis faaliyetlerini iyileştirmek, yönetim verimliliğini artırmak, İşletme ve Bakım aşamasında tesisi izlemek ve kontrol etmek ve tesis yöneticilerinin karar vermesini desteklemek için yeni bir işlevsellik sağlamaktadır.

Uygulama çerçevesinde, izlenen verileri BIM modelindeki ilgili geometrik alanla birleştirmek için buluttaki birden fazla sensör sistemi tarafından toplanan iç ortam verilerini BIM tabanlı bir modelle entegre edilmiştir. Önerilen çerçevenin uygulanmasını test etmek ve doğrulamak için mevcut bir üniversite binasının kullanım durumu çalışması kullanılmıştır. İzleme verilerinin görselleştirilmesi için BIM, IoT, bulut ve AI entegrasyonu konusunda önceki çalışmalardan özetlenen iş akışının ardından beş katmanlı bir metodoloji ile uygulanmıştır.

Beş ana katman aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

- 1. BIM Katmanı (As-Built BIM Modeli):** Tek bir birlikte çalışabilir veri seti ile BIM kullanan inşa edilmiş ortam için uyarlama ürün yaşam döngüsü yönetimi olan bina yaşam döngüsü yönetimini etkinleştirmek için Revit kullanılarak bina için As-built BIM modeli oluşturulmuştur.
- 2. Veri Toplama ve İzleme Katmanı (IoT İç Mekan Çevre Kalitesi İzleme Sistemi):** İç Mekan Çevre Kalitesini (IEQ) gerçek zamanlı olarak izlemek için fiziksel varlığa yerleştirilen IoT sensör cihazlarından oluşmaktadır.
- 3. Veri İşleme Katmanı (IoT Bulut Platformu):** Alt bölüm, kullanılacak bulut tabanlı platform olan Arduino IoT Cloud'u tanıtmaktadır. Arduino IoT Cloud, kullanıcı dostu bir arayüz ile IoT projeleri oluşturmak, dağıtmak ve izlemek için kullanılacak çevrimiçi bir platform ve yapılandırma, kod yazma, yükleme ve görselleştirme için hepsi bir arada bir çözümdür.
- 4. Veri Entegrasyon Katmanı:** Revit, Arduino IoT Cloud ve Unreal Engine içinde BIM modeli ile IoT sensör verileri arasında dinamik bir entegrasyon süreci oluşturulmuştur.
- 5. Veri Görselleştirme ve Analiz Katmanı (Unreal Engine):** Veri entegrasyonu oluşturma sürecinden geçtikten sonra, UI bileşenleri kullanılarak Unreal Engine'de görselleştirilen, BIM modeli ve sensör verilerini birleştiren çıktı olan

veri görselleştirme bölümü gelmektedir. ARSHER, ISO, Avrupa Standardı ve ABD Çevre Koruma Ajansı gibi servis kaynaklarından alınan sensör verileri sonuçları rahat değerleri ile karşılaştırmak için Unreal Engine kullanıcı arayüzüne karar verme panosu eklenmiştir.

Üniversite binası için dijital ikiz modeli, Mühendislik ve Teknoloji Enstitüsü'nün dijital İkiz olgunluk unsurlarına göre geliştirilmiştir:

Öğe 1: AutoCAD kullanılarak bina için A-inşa edilmiş 2D CAD çizimleri oluşturulmuştur.

Öğe 2: Tek bir birlikte çalışabilir veri seti ile BIM kullanan yapılı çevre için ürün yaşam döngüsü yönetiminin uyarlanması olan bina yaşam döngüsü yönetimini etkinleştirmek için Revit kullanılarak bina için yerleşik bir BIM modeli oluşturulmuştur. Amaç, operasyonel yaşam döngüleri boyunca binaların operasyonlarını ve bakımını yönetmek için bina bilgilerini kullanmak ve sürdürmek için verimli bir ortam yaratmaktır. Revit için Autodesk COBie Uzantısı, operasyon verilerini, bakım verilerini ve tesis varlık yönetimini COBie formatında yakalamak için kullanılmıştır. Veri türü statik veridir, veriler kaydedildikten sonra bina bilgilerini otomatik olarak güncelleyememektedir.

Öğe 3: Binanın fiziksel koşullarını izlemek ve kaydetmek için binaya Kablosuz Sensör Ağları (WSN'ler) kurulmuştur. IoT İç Ortam Kalite İzleme Sistemi kullanılarak geliştirilmiştir.

Birkaç IoT ESP32 mikrodenetleyici kullanılmıştır. Binaların iç ortam hava kalitesi, termal konfor, görsel konfor ve akustik konfor gibi iç çevre kalitesini ölçmek için tüm sensörleri bağlamak için ESP32 kullanılmıştır. Dinamik veriler, fiziksel binadan dijital varlığa tek yönlü bir akış yoluyla sensörlerden ve IoT cihazlarından gerçek zamanlı olarak elde edilmektedir. Toplanan veriler, tesis yöneticileri tarafından karar vermede varlık sağlamak için analiz edilmek üzere Arduino IoT Bulutu'nda saklanmaktadır.

Öğe 4: Yapay zekayı BIM ile entegre etmek, IoT tesis yönetim sistemleri şunları sağlamaktadır. Bu seviyede, iç ortamın izlenmesi ve kontrol edilmesi için fiziksel varlık ile dijital varlık arasında iki yönlü entegrasyon kurulmaktadır.

Unreal Engine ve Arduino gibi Revit dışında Digital Twin modelinin geliştirilmesinde kullanılan tüm yazılımlar ücretsiz ve açık kaynak kodludur. Aşağıdakiler, vaka çalışması projesinde ücretsiz ve açık kaynaklı yazılım seçiminin avantajları olarak sıralanmaktadır:

- **Maliyet Etkinliği:** Açık kaynaklı yazılımın kullanılması, örnek olay projesinin lisans ücretlerinden ve bakım ücretlerinden tasarruf sağlayarak giderlerin en aza indirilmesine yardımcı olmaktadır.
- **Yoğun Destek:** Açık kaynak desteği çoğunlukla ücretsiz olarak sağlanmakta ve çevrimiçi topluluklar aracılığıyla kolayca erişilebilir olmaktadır. Bu nedenle, vaka çalışmasının geliştirilmesi sırasında birçok yüksek kaliteli ücretsiz kütüphane ve ücretsiz öğrenme kaynağı kullanılmıştır.
- **Entegre Yönetim:** Açık kaynaklı yazılım kullanmak, entegre yönetimden faydalanabilmektedir. Açık kaynaklı yazılım, açık standart dosya formatı ve JSON gibi veri değişim formatına ek olarak REST API ve MQTT protokolü gibi teknolojileri kullanmaktadır. Bu, BIM, FM, IoT ve Bulut arasında sorunsuz entegrasyon sağlamaktadır.

Vaka çalışması, önceki çalışmalarda tespit edilen aşağıda örnekleri verilen birçok boşluğu doldurmayı başarmaktadır:

- FM'de veri alışverişi formatındaki BIM uygulaması ve bilgi yönetimi sistemindeki zorluklar, organize bir yapılandırılmış format olan COBie kullanılarak çözülmüştür ve ardından herhangi bir veri kaybı olmadan Unreal Engine'e aktarılmıştır.
- IoT'de BIM uygulaması, BIM ve IoT arasında kusursuz bir entegrasyon oluşturmada karşılaşılan zorluklar, Arduino açık kaynaklı yazılım ve donanım kullanılarak çözülmüştür.
- Bulutta BIM ve IoT uygulama zorlukları, açık standart dosya formatı ve benzeri veri değişim formatı olan JSON kullanılarak çözülmüştür. JSON formatı, REST API kullanılarak bulut ve Unreal motoru arasında veri alışverişi yapmak için kullanılmıştır.

- Yazarların bildiği kadarıyla, bu, ücretsiz bir açık kaynak yazılımı kullanılarak gerçek zamanlı olarak bir Dijital İkiz geliştirilmesi için BIM, FM, IoT ve Cloud'u entegre eden izleme ve görselleştirme referans uygulamasını kullanan ilk çalışmadır. Bu uygulama çerçevesi büyük faydalar ve potansiyeller sergilemiştir.

Bu çerçevenin faydalarının yanı sıra sınırlamaları da bulunmaktadır. Bu dijital ikiz projesinin geliştirilmesi sırasında çeşitli zorluklarla karşılaşmıştır.

Kod hata ayıklama ve sensör verilerini buluta gönderirken yönetim gibi performans sorunlarıyla karşılaşmıştır, bu da yükleme zaman aşımı nedeniyle yükün iptal edilmesi gibi gecikmeli geri dönüş hatalarına neden olmuştur. Ayrıca, BIM'i bulut, yapay zeka ve IoT tesis yönetim sistemleriyle entegre etmek için yeterli kaynak ve desteğin olmaması diğer sorunların başında gelmektedir, çünkü bu konular nispeten yeni kabul edilen ve uygulanan konu başlıklarındandır.

Ayrıca sensörleri ESP32 mikrodenetleyicilere bağlamak için elektronik bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır ve her sensörün farklı bir bağlantı tipine ihtiyacı bulunmaktadır.

Ayrıca, her sensörün farklı bir kodu ve kütüphanesi olduğu için bu işlem için gereken programlama bilgisi seviyesinin de yüksek olması gerekmektedir.

Uygulama çerçevesi üzerinde daha fazla araştırma ve iyileştirme, Mühendislik ve Teknoloji Enstitüsü'ne göre dijital İkiz olgunluk unsurlarının 5. ögesine ulaşılmasına odaklanabilmektedir. Element 5, yapay zeka ve makine öğrenimi kullanarak dijital ikizin özerk operasyonlarını ve bakımını başlatma düzeyi olarak ifade edilmektedir. Bu düzeyde, dijital ikiz öğrenmekte, veriye dayalı kararlar vermekte ve çok az insan etkileşimi ile veya hiç etkileşim olmadan görevleri özerk bir şekilde tamamlamaktadır.

Ek olarak, daha iyi içgörüler ve tahmine dayalı analiz sağlamak için Microsoft Power BI gibi analiz araçlarının entegrasyonu için bir dijital ikiz veri analizi bölümüne odaklanılmalı ve binanın performansına ilişkin doğru bilgilerin sürekli güncellenmesine izin verilmelidir. Son olarak, dijital dönüşümün artan yükselişine, Sanal Gerçeklik (VR), Artırılmış Gerçeklik (AR) ve Karma Gerçeklik (MR) gibi sürükleyici teknolojiler aracılığıyla gelişmiş görselleştirme metodolojilerinin geliştirilmesine uyum sağlamak gerekli görülmektedir.

Son olarak, dijital ikiz uygulamasını değerlendirmek için Microsoft, Oracle, Arup, KEO International Consultants ve Foster + Partners gibi dünya çapında saygın şirketlerde çalışan teknoloji, mimarlık, mühendislik ve inşaat alanlarındaki uzmanlar ile görüşmeler yapılmıştır.

Bu görüşmelerin sonuçları aşağıdaki noktalara odaklanmaktadır:

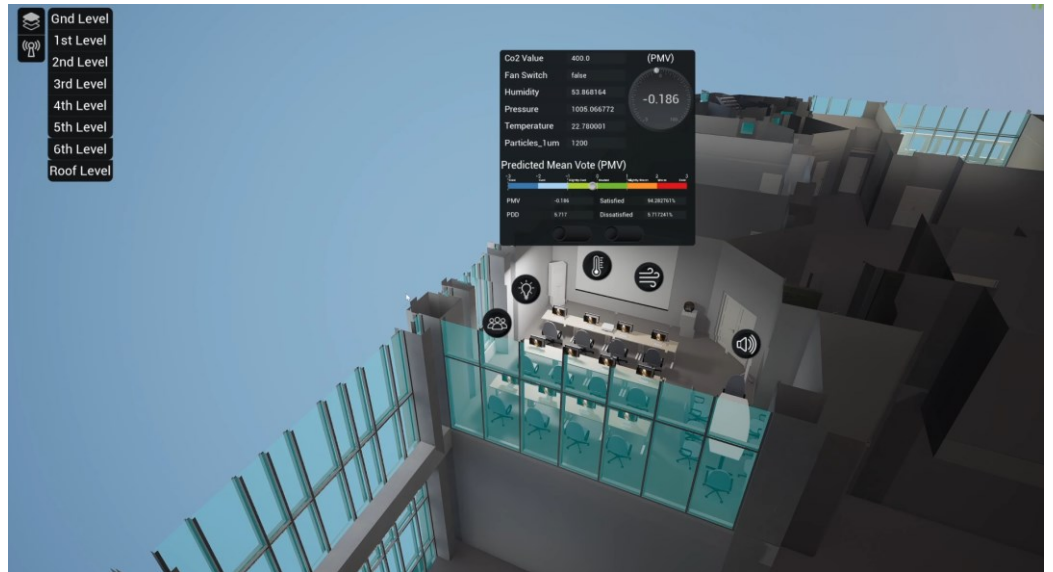
1. Kullanıcı Arayüzü (UI) ve Kullanıcı Deneyimi (UX):

Uzmanlar, önerilen dijital ikiz uygulamasında UI/UX tasarımını iyileştirmeye yardımcı olan çok sayıda geri bildirim verdiler.

UX tasarımında, uzmanların görüşleri doğrultusunda yapılan önemli değişikliklerden biri de 3B görünümün birinci şahıs görünümünden (Şekil 49) perspektif kamera görünümüne dönüştürülmesidir (Şekil 57).

Unreal Engine'de 3D oyun ve uygulama geliştirmede birinci şahıs bakış açıları daha popüler olsa da, mimarlık, mühendislik ve inşaat alanlarındaki uzmanlar, Revit, Navisworks, 3ds Max, SketchUp ve Rhino gibi aşına oldukları 3D yazılımlara benzer 3D navigasyon deneyimi sağlayan perspektif kamera görüntüsü kullanmayı tercih ettiler.

Ayrıca, bina katları arasında gezinmeye yönelik UI/UX tasarımı, Revit'teki 3B kesitler gibi BIM yazılımındaki benzer bir gezinme deneyimini uzmanlara yaşatmak için yeniden tasarlandı (Şekil 57).



Şekil 57: Windows İşletim Sistemi İçin Geliştirilmiş Dijital İkiz Uygulaması (Perspektif Kamera Görüntüsü)

2. Sertifikalı IoT Cihazları ve Sensörler:

Uzmanlar, ticari kullanım için IoT cihazlarının ve sensörlerinin, proje gereksinimine veya ülkeye göre değişebilen belirli devlet standartlarına, kalite göstergelerine, sertifika işaretlerine ve güvenlik standartlarına uyması gerektiğini belirtti. Örneğin, Conformité Européenne (CE), Avrupa sağlık, güvenlik ve çevre koruma standartlarına uygun ürünleri Avrupa Ekonomik Bölgesi'nde (EEA) satmak veya kullanmak için doğrulayan bir düzenleyici standarttır ve uzmanlar CE sertifikasına uygun IoT cihazları ve sensörleri kullanmak gerektiğini belirttiler.

3. Akıllı Bina Meta Veri Standartları:

Uzmanlar, büyük ölçekli dijital dönüşümde veri yönetimi ve birlikte çalışabilirlik sorunlarını çözmek için akıllı bina meta veri standartları RealEstateCore ve Brick Schema kullanmanın önemine dikkat çektiler.

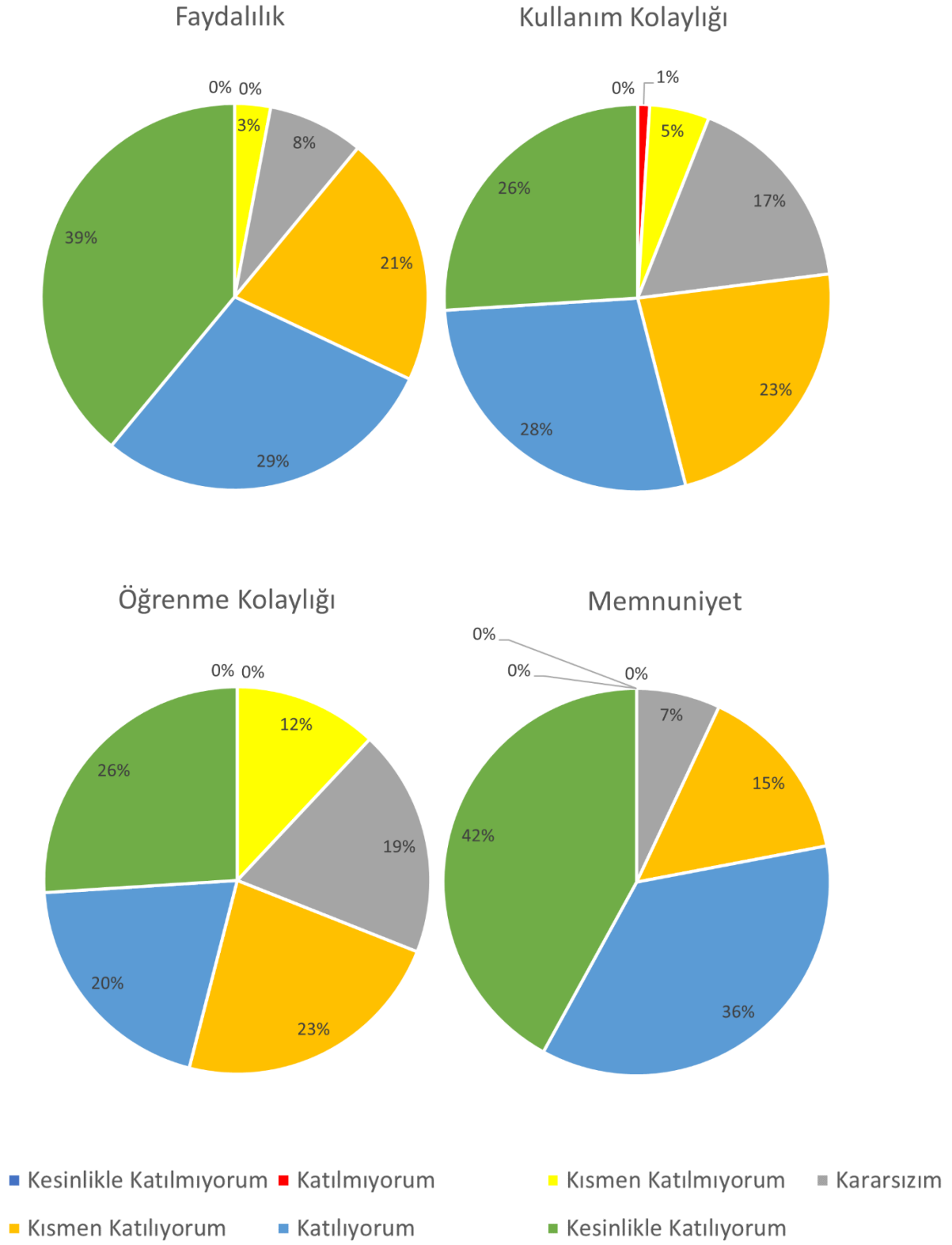
a) **RealEstateCore:** Bina yapıları, mülkiyet, sakinler, teknik sistemler, sensörler ve olaylar gibi bina sistemlerinden üretilen verilerde ortaya çıkan kavramları ve ilişkileri açıklar. Temel olarak, bir kullanıcı arayüzünün oluşturulmasına izin veren teknik yapılandırıcı ve yapı görevi görür. Bu kullanıcı arabirimi, mülk sahiplerinin, bina veya teknolojiye özgü uygulama ayrıntıları ve formatları hakkında endişe duymadan, binalarını büyük ölçekte yeni hizmetlere bağlamasına olanak tanır.

b) **Brick Schema:** Teknik bina varlıklarının standartlaştırılmış açıklamalarını sağlar. Bu, bina sahiplerine bir binadaki ısıtma ve havalandırma, aydınlatma ve güvenlik sistemleri gibi çeşitli alt sistemlerin yanı sıra bunlar arasındaki ilişkiler hakkında entegre bir genel bakış sağlar. Mevcut araçlar ve veri tabanlarıyla sorunsuz bir şekilde entegre olan Brick, analitik ve akıllı kontrol uygulamalarının devreye alınması ve bakımıyla ilgili maliyetlerin düşürülmesine ve uygulamanın basitleştirilmesine yardımcı olur.

Tüm bu standartlar bulutta uygulanır. Bu projede kullanılan Arduino IoT bulut hizmeti bu standartları desteklemediği için, bu standartlar önerilen projede kullanılmadı. Bu araştırmanın yazıldığı tarihe kadar sadece Microsoft Azure bulutunun bu standartları desteklediği tespit edilmiştir.

Görüşmeleri önerilen dijital ikiz platformun öznel kullanılabilirliğini ölçmek için Yararlılık, Memnuniyet ve Kullanım Kolaylığı Lund anketi (Lund, 2001) takip etti. Anket teknoloji tabanlı araştırmaya uygun dört kullanılabilirlik kategorisini analiz eden 30 sorudan oluşmaktadır: Faydalılık, kullanım kolaylığı, öğrenme kolaylığı ve memnuniyet. Bu ankete 35 kişi katılmıştır. Tüm anket detayları EK A'da mevcuttur.

Anket sonuçlarına bakıldığında, uygulamanın deneyenler açısından oldukça faydalı olduğu, kullanımının ve öğrenmesinin kolay olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, bu tez çalışmasının Dijital İkiz uygulamaları için yeni sorular ve öngörüler ortaya koyarak gelecek çalışmalara yön vermesi beklenmektedir.



Şekil 58: Faydalılık, kullanım kolaylığı, öğrenme kolaylığı ve memnuniyete göre katılımcı anketi oylarının yüzde oranı

KAYNAKLAR

- Ali, T. H., Akhund, M. A., Memon, A. H., Imad, H. U., & Khahro, S. H. (2019). *Application of Artificial Intelligence in Construction Waste Management*.
- Andersen, M., Kleindienst, S., Yi, L., Lee, J., Bodart, M., & Cutler, B. (2008). An intuitive daylighting performance analysis and optimization approach. *Building Research and Information*, 36(6), 593–607.
<https://doi.org/10.1080/09613210802243159>
- ASHRAE. (2004). *ASHRAE Standard 55-2004: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. www.ashrae.org
- ASHRAE. (2019). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. www.ashrae.org
- ASHRAE. (2021). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. www.ashrae.org
- Azar, E., O'Brien, W., Carlucci, S., Hong, T., Sonta, A., Kim, J., Andargie, M. S., Abuimara, T., el Asmar, M., Jain, R. K., Ouf, M. M., Tahmasebi, F., & Zhou, J. (2020). Simulation-aided occupant-centric building design: A critical review of tools, methods, and applications. In *Energy and Buildings* (Vol. 224). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110292>
- Aziz, N. D., Nawawi, A. H., & Ariff, N. R. M. (2016). Building Information Modelling (BIM) in Facilities Management: Opportunities to be Considered by Facility Managers. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 234, 353–362.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.10.252>
- Becerik-Gerber, B., Jazizadeh, F., Li, N., & Calis, G. (2012a). Application Areas and Data Requirements for BIM-Enabled Facilities Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(3), 431–442.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000433](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000433)
- Becerik-Gerber, B., Jazizadeh, F., Li, N., & Calis, G. (2012b). Application Areas and Data Requirements for BIM-Enabled Facilities Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(3), 431–442.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000433](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000433)
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (2018). Building Information Modeling: Why? What? How? Technology foundations and industry practice. *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice*, 1–584. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3>
- Bouabdallaoui, Y., Lafhaj, Z., Yim, P., Ducoulombier, L., & Bennadji, B. (2021). Predictive maintenance in building facilities: A machine learning-based approach. *Sensors (Switzerland)*, 21(4), 1–15.
<https://doi.org/10.3390/s21041044>
- British Standards Institution. (2014). *BS 1192-4:2014 Collaborative production of information Part 4: Fulfilling employer's information exchange requirements using COBie-Code of practice*.
- British Standards Institution. (2019a). *BS EN 16798-1:2019 Energy performance of buildings. Ventilation for buildings - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Module M1-6*.
<https://knowledge.bsigroup.com/products/energy-performance-of-buildings-ventilation-for-buildings-indoor-environmental-input-parameters-for-design>

- and-assessment-of-energy-performance-of-buildings-addressing-indoor-air-quality-thermal-environment-lighting-and-acoustics-module/tracked-changes
- British Standards Institution. (2019b). *ISO 19650-2:2018 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) : Information management using building information modelling. Part 2, Delivery phase of the assets.*
- British Standards Institution. (2021). *ISO 19650-4:2022 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 4: Information exchange.* www.iso.org
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. v., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R. v., Mittleman, M. A., Peters, A., Siscovick, D., Smith, S. C., Whitsel, L., & Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the american heart association. In *Circulation* (Vol. 121, Issue 21, pp. 2331–2378). <https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181dbee1>
- Building the Digital. (2018). *BIM for Beginners - 6 key terms you need to know about BIM technology.* <https://www.buildingthedigital.com/blog/bim-beginners>
- buildingSMART International. (2020). *Enabling an Ecosystem of Digital Twins.* <https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/05/Enabling-Digital-Twins-Positioning-Paper-Final.pdf>
- Burnett, R. T., Pope, C. A., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, 287(9), 1132–1141. <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>
- Carbonari, G., Stravoravdis, S., & Gausden, C. (2015). Building information model implementation for existing buildings for facilities management: a framework and two case studies. *Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations, 1*, 395–406. <https://doi.org/10.2495/bim150331>
- Carlucci, S., Causone, F., de Rosa, F., & Pagliano, L. (2015). A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 47, pp. 1016–1033). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.062>
- Cassino, K. E., Bernstein, H. M., Asce, F., Ap, L., Russo, M. A., Advisor, A. E., Jones, S. A., Laquidara-Carr, D., Manager, W. T., Operations, C., Ramos, J., Director, A., Lorenz, A., & Yamada, T. (2014). *SmartMarket Report McGraw Hill Construction The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets: How Contractors Around the World Are Driving Innovation With Building Information Modeling SmartMarket Report Executive Editor.* www.construction.com
- Centre for Digital Built Britain. (2018). *The Gemini Principles.* <https://doi.org/10.17863/CAM.32260>
- Chang, K. M., Dzen, R. J., & Wu, Y. J. (2018). An automated IoT visualization BIM platform for decision support in facilities management. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/app8071086>
- Charles M. Eastman. (1975). *The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design.* <https://www.researchgate.net/publication/234643558>

- Cheng, M. Y., Chiu, K. C., Hsieh, Y. M., Yang, I. T., Chou, J. S., & Wu, Y. W. (2017). BIM integrated smart monitoring technique for building fire prevention and disaster relief. *Automation in Construction*, 84, 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.027>
- Chou, C. C., Chiang, C. T., Wu, P. Y., Chu, C. P., & Lin, C. Y. (2017). Spatiotemporal analysis and visualization of power consumption data integrated with building information models for energy savings. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.008>
- Chuang, T.-H., Lee, B.-C., & Wu, I.-C. (2011). *Applying Cloud Computing Technology to BIM Visualization and Manipulation*.
- Dahanayake, K. C., & Sumanarathna, N. (2021). IoT-BIM-based digital transformation in facilities management: a conceptual model. *Journal of Facilities Management*. <https://doi.org/10.1108/JFM-10-2020-0076>
- Das, M., Cheng, J. C. P., & Shiv Kumar, S. (2014). *BIMCloud: A Distributed Cloud-based Social BIM Framework for Project Collaboration*.
- Dave, B., Buda, A., Nurminen, A., & Främling, K. (2018). A framework for integrating BIM and IoT through open standards. *Automation in Construction*, 95, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.022>
- DiLaura, D. L., Houser, K. W., Mistrick, R. G., & Steffy, G. R. (2018). The Lighting Handbook (10th Edition). *The Lighting Handbook*, 1328. <https://www.zumtobel.com/PDB/teaser/SV/Lichthandbuch.pdf>
- Ding, L., Jiang, W., & Zhou, C. (2022). IoT sensor-based BIM system for smart safety barriers of hazardous energy in petrochemical construction. *Frontiers of Engineering Management*, 9(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s42524-021-0160-6>
- Ding, L., & Xu, X. (2014). Application of cloud storage on BIM life-cycle management. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11(1). <https://doi.org/10.5772/58443>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Lee, G. (2018). *BIM handbook : a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. <https://doi.org/10.1002/9781119287568>
- Edirisinghe, R., London, K. A., Kalutara, P., & Aranda-Mena, G. (2017). Building information modelling for facility management: Are we there yet? *Engineering, Construction and Architectural Management*, 24(6), 1119–1154. <https://doi.org/10.1108/ECAM-06-2016-0139>
- Edirisinghe, R., & Woo, J. (2021). BIM-based performance monitoring for smart building management. *Facilities*, 39(1–2), 19–35. <https://doi.org/10.1108/F-11-2019-0120>
- European Standard. (2007). *EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*.
- European Standard. (2022). *UNE EN 12464-1:2022 Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places - European Standards*.
- Fanger, P. O. (1970). Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*.
- Flexera. (2022). *Flexera 2022 State of the Cloud Report*.
- Francisco, A., Truong, H., Khosrowpour, A., Taylor, J. E., & Mohammadi, N. (2018). Occupant perceptions of building information model-based energy

- visualizations in eco-feedback systems. *Applied Energy*, 221, 220–228.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.132>
- Grieves, M. (2006). Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking. In *J Prod Innov Manag*. McGraw Hill.
- Han, C., & Ye, H. (2018). *A Novel IoT-Cloud-BIM Based Intelligent Information Management System in Building Industrialization*.
- Hilal, M., Maqsood, T., & Abdekhodae, A. (2019). A scientometric analysis of BIM studies in facilities management. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 37(2), 122–139. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-04-2018-0035>
- Institution of Engineering and Technology (IET). (2019). *Digital Twins for The Built Environment*. <https://www.theiet.org/media/8762/digital-twins-for-the-built-environment.pdf>
- IoT Analytics. (2022). *State of IoT Spring 2022 Report*. <https://iot-analytics.com/product/state-of-iot-spring-2022/>
- ISO. (2005). *ISO 7730-2005: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. www.iso.org
- Kensek, K. (2015). BIM guidelines inform facilities management databases: A Case Study over Time. *Buildings*, 5(3), 899–916.
<https://doi.org/10.3390/buildings5030899>
- Kim, K., & Lee, Y. C. (2019). Automated generation of daily evacuation paths in 4D BIM. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/app9091789>
- Kumar, M., & Kar, I. N. (2009). Non-linear HVAC computations using least square support vector machines. *Energy Conversion and Management*, 50(6), 1411–1418. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.03.009>
- Lavy, S., Saxena, N., & Dixit, M. (2019). Effects of BIM and COBie Database Facility Management on Work Order Processing Times: Case Study. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(6), 04019069.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001333](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001333)
- Lee, D., Cha, G., & Park, S. (2016a). A study on data visualization of embedded sensors for building energy monitoring using BIM. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(6), 807–814.
<https://doi.org/10.1007/s12541-016-0099-4>
- Lee, D., Cha, G., & Park, S. (2016b). A study on data visualization of embedded sensors for building energy monitoring using BIM. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(6), 807–814.
<https://doi.org/10.1007/s12541-016-0099-4>
- Lee, S.-K., An, H.-K., & Yu, J.-H. (2012). *An Extension of the Technology Acceptance Model for BIM-based FM*.
- Liang, Y., & Liu, Q. (2022). Early warning and real-time control of construction safety risk of underground engineering based on building information modeling and internet of things. *Neural Computing and Applications*, 34(5), 3433–3442.
<https://doi.org/10.1007/s00521-021-05755-8>
- Lin, Y. C., & Su, Y. C. (2013). Developing mobile- and BIM-based integrated visual facility maintenance management system. *The Scientific World Journal*, 2013.
<https://doi.org/10.1155/2013/124249>
- Liu, C.-C., Kuo, W.-L., Shiu, R.-S., & Wu, I.-C. (2016). *Estimating and Visualizing Thermal Comfort Level via a Predicted Mean Vote in a BIM System*.
- Liu, T. X. (2017). *Developing interactive connections between BIM and facilities information systems for end user functionalities*. www.aalto.fi

- Liu, Z., Wang, Q., Gan, V. J. L., & Peh, L. (2020). Envelope thermal performance analysis based on building information model (BIM) cloud platform - Proposed green mark collaboration environment. *Energies*, *13*(3).
<https://doi.org/10.3390/en13030586>
- Liu, Z., Zhang, A., & Wang, W. (2020). A framework for an indoor safety management system based on digital twin. *Sensors (Switzerland)*, *20*(20), 1–20.
<https://doi.org/10.3390/s20205771>
- Lund, A. (2001). *Measuring Usability with the USE Questionnaire*.
<https://www.researchgate.net/publication/230786746>
- Ma, G., Liu, Y., & Shang, S. (2019). A Building Information Model (BIM) and Artificial Neural Network (ANN) based system for personal thermal comfort evaluation and energy efficient design of interior space. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(18). <https://doi.org/10.3390/su11184972>
- Ma, L., & Sacks, R. (2016). *A Cloud-based BIM Platform for Information Collaboration*.
- Mahamadu, A. M., Mahdjoubi, L., & Booth, C. (2013). Challenges to bim-cloud integration: Implication of security issues on secure collaboration. *Proceedings of the International Conference on Cloud Computing Technology and Science, CloudCom, 2*, 209–214. <https://doi.org/10.1109/CloudCom.2013.127>
- Marquez, A. C., Fernandez, J. F. G., Fernández, P. M. G., & Lopez, A. G. (2020). Maintenance management through intelligent asset management platforms (IAMP). Emerging factors, key impact areas and data models. *Energies*, *13*(15).
<https://doi.org/10.3390/en13153762>
- Mell, P. M., & Grance, T. (2011). *The NIST definition of cloud computing*.
<https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-145>
- Microsoft. (2021). *Microsoft IoT Signals Report Edition 3*.
- Motawa, I., & Almarshad, A. (2013). A knowledge-based BIM system for building maintenance. *Automation in Construction*, *29*, 173–182.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.008>
- Natephra, W., & Motamedi, A. (2019). Live Data Visualization of IoT Sensors Using Augmented Reality (AR) and BIM. *International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019)*, *36*, 632–638.
<https://doi.org/10.22260/ISARC2019/0084>
- National Building Specification. (2020). *NBS 10th Annual BIM Report 2020*.
- National Building Specification. (2021). *NBS Digital Construction Report 2021*.
- Oti, A. H., Kurul, E., Cheung, F., & Tah, J. H. M. (2016a). A framework for the utilization of Building Management System data in building information models for building design and operation. *Automation in Construction*, *72*, 195–210.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.043>
- Oti, A. H., Kurul, E., Cheung, F., & Tah, J. H. M. (2016b). A framework for the utilization of Building Management System data in building information models for building design and operation. *Automation in Construction*, *72*, 195–210.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.043>
- Pärn, E. A., Edwards, D. J., & Sing, M. C. P. (2017). The building information modelling trajectory in facilities management: A review. In *Automation in Construction* (Vol. 75, pp. 45–55). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.12.003>
- Parrott, A., & Warshaw, L. (2017). *Industry 4.0 and the Dijital İkiz - Manufacturing Meets Its Match*.

- Peng, Y., Lin, J. R., Zhang, J. P., & Hu, Z. Z. (2017). A hybrid data mining approach on BIM-based building operation and maintenance. *Building and Environment*, 126, 483–495. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.030>
- Peng, Y., Zhang, M., Yu, F., Xu, J., & Gao, S. (2020). Digital Twin Hospital Buildings: An Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration. *Advances in Civil Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8846667>
- Piasek, B., Vickers, J., Lowry, D., Scotti, S., Stewart, J., & Calomino, A. (2010). *NASA Technology Area 12 - Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing Road Map November 2010*.
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 56(6), 709–742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Prakash Jawadkar, S. (2012). *A Case Study of Using BIM and COBie for Facility Management*.
- Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. (2016). “Why should i trust you?” Explaining the predictions of any classifier. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 13-17-August-2016*, 1135–1144. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939778>
- Rupp, R. F., Kazanci, O. B., & Toftum, J. (2021). Investigating current trends in clothing insulation using a global thermal comfort database. *Energy and Buildings*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111431>
- Shahinmoghadam, M., & Motamedi, A. (2019). Review of BIM-centred IoT Deployment: State of the Art, Opportunities, and Challenges. *International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019)*, 36, 1268–1275. <https://doi.org/10.22260/ISARC2019/0170>
- Shahinmoghadam, M., Natephra, W., & Motamedi, A. (2021). BIM- and IoT-based virtual reality tool for real-time thermal comfort assessment in building enclosures. *Building and Environment*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107905>
- Shalabi, F., & Turkan, Y. (2017). IFC BIM-Based Facility Management Approach to Optimize Data Collection for Corrective Maintenance. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(1), 04016081. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000941](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000941)
- Shukla, P. R., Skea, J., Reisinger, A., Slade, R., Fradera, R., Pathak, M., Al, A., Malek, K., Renée Van Diemen, B., Hasija, A., Lisboa, G., Luz, S., Malley, J., Mccollum, D., & Some, S. (2022). *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for Policymakers Edited by*. www.ipcc.ch
- Silvester, J., & Konstantinou, E. (2010). *Lighting, Well-being and Performance at Work*.
- Speizer, F. E., Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., & Ferris, B. G. (1993). An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *New England Journal of Medicine*, 329(24), 1753–1759. <https://doi.org/10.1056/nejm199312093292401>
- Suprabhas, K., & Dib, H. N. (2017). Integration of BIM and Utility Sensor Data for Facilities Management. *Computing in Civil Engineering 2017* 26.
- Tang, S., Shelden, D. R., Eastman, C. M., Pishdad-Bozorgi, P., & Gao, X. (2019). A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. In *Automation in*

- Construction* (Vol. 101, pp. 127–139). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020>
- Teicholz, P. ., & IFMA Foundation. (2013). *BIM for Facility Managers*.
<https://doi.org/10.1002/9781119572633>
- Teicholz, P. M., & IFMA Foundation. (2013). *BIM for Facility Managers*.
 UK BIM Alliance State of the Nation Survey Report. (2021). *UK BIM Alliance*.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2012). *Revised air quality standards for particle pollution and updates to the Air Quality Index (AQI)*.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2014). *Air Quality Index - A Guide to Air Quality and Your Health*.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2019). *Guidelines for Human Exposure Assessment Risk Assessment Forum*. www.epa.gov/risk
- U.S. Environmental Protection Agency. (2020). *Policy Assessment for the Review of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter*.
- Vivi, Q. L., 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. *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019, ICSIC 2019: Driving Data-Informed Decision-Making*, 67–75. <https://doi.org/10.1680/icsic.64669.067>
- Wang, C., Si, Y., Abdul-Rahman, H., & Wood, L. C. (2015). Noise annoyance and loudness: Acoustic performance of residential buildings in tropics. *Building Services Engineering Research and Technology*, 36(6), 680–700.
<https://doi.org/10.1177/0143624415580444>
- Wang, S. H., Wang, W. C., Wang, K. C., & Shih, S. Y. (2015). Applying building information modeling to support fire safety management. *Automation in Construction*, 59, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.001>
- Wetzel, E. M., & Thabet, W. Y. (2016). Utilizing Six Sigma to develop standard attributes for a Safety for Facilities Management (SFFM) framework. *Safety Science*, 89, 355–368. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.07.010>
- Whitmore, A., Agarwal, A., & da Xu, L. (2015). The Internet of Things—A survey of topics and trends. *Information Systems Frontiers*, 17(2), 261–274.
<https://doi.org/10.1007/s10796-014-9489-2>
- Wong, J., Wang, X., Li, H., Chan, G., & Li, H. (2014). A review of cloud-based BIM technology in the construction sector. In *Journal of Information Technology in Construction* (Vol. 19). <http://www.itcon.org/2014/16>
- Yang, L., Yang, S. H., & Plotnick, L. (2013). How the internet of things technology enhances emergency response operations. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(9), 1854–1867.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.07.011>
- Yin, X., Liu, H., Chen, Y., Wang, Y., & Al-Hussein, M. (2020). A BIM-based framework for operation and maintenance of utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103252>
- Zaballos, A., Briones, A., Massa, A., Centelles, P., & Caballero, V. (2020). A smart campus' digital twin for sustainable comfort monitoring. *Sustainability (Switzerland)*, 12(21), 1–33. <https://doi.org/10.3390/su12219196>
- Zhao, Q., Lian, Z., & Lai, D. (2021). Thermal comfort models and their developments: A review. *Energy and Built Environment*, 2(1), 21–33.
<https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.05.007>

EKLER

EK A : Yararlılık, Memnuniyet ve Kullanım Kolaylığı Anket anketi

Bu anket alışması, MSGSÜ – Fen Bilimleri Enstitüsü – Mimari ve Kentsel Enformatik Programı yüksek lisans tezi kapsamında.

Görüşmeleri önerilen dijital ikiz platformun öznel kullanılabilirliğini ölçmek için Yararlılık, Memnuniyet ve Kullanım Kolaylığı Lund anketi (Lund, 2001) takip etti. Anket teknoloji tabanlı araştırmaya uygun dört kullanılabilirlik kategorisini analiz eden 30 sorudan oluşmaktadır: Faydalılık, kullanım kolaylığı, öğrenme kolaylığı ve memnuniyet. Bu ankete 35 kişi katılmıştır.

Kategori	Soru	Kesinlikle Katılmıyorum	Katılmıyorum	Kararsızım	Kısmen Katılmıyorum	Kısmen Katılıyorum	Kesinlikle Katılıyorum
Faydalılık	01. Daha etkili olmama yardımcı oluyor.	0	0	1	1	11	8
Faydalılık	02. Daha üretken olmama yardımcı oluyor.	0	0	1	2	9	9
Faydalılık	03. Uygulama kullanışlıdır.	0	0	1	0	4	15
Faydalılık	04. Hayatımdaki aktiviteler üzerinde daha fazla kontrol sahibi olmamı sağlıyor.	0	0	5	0	7	10
Faydalılık	05. Başarmak istediğim şeyleri daha kolay halletmemi sağlıyor.	0	0	2	0	10	9
Faydalılık	06. Kullandığımda bana zaman kazandırıyor.	0	0	3	0	5	10
Faydalılık	07. Benim ihtiyaçlarımı karşılıyor.	0	0	3	2	8	9
Faydalılık	08. Yapmasını beklediğim her şeyi yapıyor.	0	0	7	3	7	10
Kullanım kolaylığı	09. Kullanımı kolaydır.	0	0	11	0	9	7
Kullanım kolaylığı	10. Kullanımı basittir.	0	0	9	2	10	5
Kullanım kolaylığı	11. Kullanıcı dostudur.	0	0	3	0	8	13
Kullanım kolaylığı	12. Onunla yapmak istediğim şeyi başarmak için mümkün olan en az adımı gerektiriyor.	0	0	6	1	11	10
Kullanım kolaylığı	13. Esneklik.	0	0	5	1	6	15
Kullanım kolaylığı	14. Bunu kullanmak zahmetsizdir.	0	1	8	3	6	9
Kullanım kolaylığı	15. Yazılı talimat olmadan kullanabiliyim.	0	1	7	6	8	5
Kullanım kolaylığı	16. Kullandıkça herhangi bir tutarsızlık görmüyorum.	0	0	6	2	10	10
Kullanım kolaylığı	17. Hem ara sıra hem de düzenli kullanıcılar bundan hoşlanır.	0	0	3	3	6	12
Kullanım kolaylığı	18. Hatalardan hızlı ve kolay bir şekilde kurtulabiliyim.	0	0	4	2	5	13
Kullanım kolaylığı	19. Her seferinde başarıyla kullanabiliyim.	0	0	5	0	9	8
Öğrenme kolaylığı	20. Çabuk kullanmayı öğrendim.	0	0	8	5	8	6
Öğrenme kolaylığı	21. Nasıl kullanacağını kolayca hatırlıyorum.	0	0	4	6	9	8
Öğrenme kolaylığı	22. Kullanmayı öğrenmek kolaydır.	0	0	8	3	9	6
Öğrenme kolaylığı	23. Hızlı bir şekilde onunla yetenekli oldum.	0	0	7	3	6	8
Memnuniyet	24. Bundan memnunum.	0	0	4	0	5	11
Memnuniyet	25. Bir arkadaşına tavsiye ederim.	0	0	1	0	4	13
Memnuniyet	26. Kullanması eğlenceli.	0	0	2	0	6	11
Memnuniyet	27. Çalışmasını istediğim şekilde çalışıyor.	0	0	1	0	7	15
Memnuniyet	28. Bu harika.	0	0	2	0	3	14
Memnuniyet	29. Ona sahip olmam gerektiğini hissediyorum.	0	0	4	0	6	12
Memnuniyet	30. Kullanması zevkli.	0	0	3	0	6	11