



**BİM TEKNOLOJİSİNİN İNCELENMESİ:
CBS ENTEGRASYONU VE DİSİPLİNLER ARASI
KATKILARI**

– UZMANLIK TEZİ –

HAZIRLAYAN:

ESRA ÇİNAREL KARAPAÇA

ANKARA-2025



**BIM TEKNOLOJİSİNİN İNCELENMESİ:
CBS ENTEGRASYONU VE DİSİPLİNLER ARASI
KATKILARI**

Tezi Hazırlayan : Esra ÇINAREL KARAPAÇA
Tez Danışmanı : Buket SAĞIROĞLU
Birim Amiri : Ömer ALAN

Esra ÇINAREL KARAPAÇA tarafından hazırlanan **BIM Teknolojisinin İncelenmesi: CBS Entegrasyonu ve Disiplinler Arası Katkıları** adlı bu tezin Coğrafi Bilgi Sistemi Uzmanlık tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Daire Başkanı
Buket SAĞIROĞLU
Tez Danışmanı

Bu alışma, tez savunma komisyonumuz tarafından Coğrafi Bilgi Sistemi Uzmanlık tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Ömer ALAN
Genel Müdür

Üye: Dr. Akın KISA
Genel Müdür Yardımcısı

Üye: Emra SERT
Daire Başkanı

Üye: Buket SAĞIROĞLU
Daire Başkanı

Üye: Dr. Ahmet DELEN
Öğretim Üyesi

Bu tez, Coğrafi Bilgi Sistemi Uzmanlığı Tez Hazırlama Yönergesi' ne uygundur.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiv
TEŞEKKÜR	xvi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
TABLO LİSTESİ	xxii
KISALTMALAR	xxiv
GİRİŞ	1

BÖLÜM 1

BIM TEKNOLOJİSİ, TEMEL KAVRAMLAR VE STANDARTLARIN İNCELENMESİ	4
1.1 BIM Teknolojisinin Çok Yönlü Tanımı	5
1.2 BIM'in Tarihsel Gelişim Süreci.....	10
1.3 BIM'in Kavramsal ve Yapısal Temelleri	12
1.3.1 Gelişim Düzeyi (LOD).....	12
1.3.2 LOD 100'den LOD 500'e Gelişim Düzeylerinin Gösterimi.....	15
1.3.3 Geometrik Temsil Seviyesi (LOG)	19
1.3.4 Bilgi İçeriği Seviyesi (LOIN).....	20
1.3.5 Gelişim Düzeyi (LOD) ve Detay Seviyesi (LoD) Kavramlarının Farkı 21	
1.3.6 LOD Kullanımının Sağladığı Faydalar	22
1.3.7 BIM Olgunluk Düzeyi	23

1.3.8	BIM Boyutları	26
1.4	BIM Platformları.....	28
1.5	BIM Kapsamındaki ISO Standartları.....	29

BÖLÜM 2

TUCBS 3B BİNA TEMASININ INSPIRE YENİLİKLERİYLE BİRLİKTE DEĞERLENDİRİLMESİ	32

2.1. INSPIRE 3B Bina Modeli Üzerindeki Yenilik ve Geliştirmeler	33
2.1.1 Zenginleştirilmiş Geometri Temsili	34
2.1.2 CityGML 2.0 ve 3.0 Versiyonları İçin LoD Gösterimi Farkı	36
2.2. INSPIRE LoD UML Şemaları ve Semantik Kapsamı	37
2.2.1 Level of Detail 0 (LoD0) UML Şeması	37
2.2.2 Level of Detail 1 (LoD1) UML Şeması	38
2.2.3 Level of Detail 2 (LoD2) UML Şeması	40
2.2.4 Level of Detail 3 (LoD3) UML Şeması	41
2.2.5 Level of Detail 4 (LoD4) UML Şeması	43
2.3. INSPIRE Yeniliklerinin TUCBS 3B Bina Teması Özelinde Değerlendirilmesi	45
2.4. 3B Bina Verilerinin IFC ile Eşlenmesi	49
2.5. TUCBS–BIM Entegrasyonu için Teknik ve Stratejik Öneriler	52
2.5.1 IFC–TUCBS LOD Eşleme Kılavuzu Oluşturulması	52
2.5.1.1 Temel Veri Dönüşüm Odaklı Eşleme	53
2.5.1.2 Analiz Odaklı Nesne Eşleme	53
2.5.2 Geometrik ve Semantik Dönüşüm Kurallarının Belirlenmesi	54

2.5.3	Coğrafi Referanslama Kılavuzunun Oluşturulması	54
2.5.4	Web Tabanlı 3B BIM Verisi Yayınlama Altyapısı.....	55
2.5.5	TUCBS ile BIM Modellerinin Eşlenmesi	56
2.5.6	TUCBS Verilerine Özgü IFC-MVD Tanımı Geliştirilmesi.....	56
2.5.7	BIM ve CBS Entegrasyonu Rehberi Oluşturulması.....	57
2.5.8	IFC'den CityGML'e Dönüşüm Şemalarının Oluşturulması	58

BÖLÜM 3

BIM'E YÖNELİK ULUSAL POLİTİKALAR VE KAMU KURUMLARININ ÇALIŞMALARI.....	59

3.1 BIM Kullanımının Ulusal Strateji Politikalarındaki Yeri..... 60

3.1.1	Cumhurbaşkanlığı On İkinci Kalkınma Planı	60
3.1.2	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Stratejik Planı	61
3.1.3	Ulusal Coğrafi Bilgi Stratejisi ve Eylem Planı	62
3.1.4	Planlı Alanlar İmar Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik.....	63

3.2 BIM Teknolojisi Kapsamında Kamu Kurum ve Kuruluşlarının Çalışmaları..... 63

3.2.1	Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü.....	63
3.2.2	Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü	65
3.2.3	Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü.....	68
3.2.4	Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı.....	70
3.2.5	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.....	71
3.2.6	İstanbul Büyükşehir Belediyesi	72

3.3	Ulusal BIM Çalıştayı Çıktılarının İncelenmesi.....	72
3.3.1	BIM Benimsenme Sürecinin Güçlü ve Zayıf Yönleri.....	74
3.3.2	Türkiye'nin Dijital İnşaat Vizyonu	76
3.3.3	Türkiye'de BIM'e Geçişin Stratejik ve Teknik Altyapısı.....	79
3.3.4	BIM'e Geçiş Süreci ve Karşılaşılan Zorluklar	81

BÖLÜM 4

KÜRESEL ÇAPTA BIM POLİTİKA VE UYGULAMALARININ İNCELENMESİ	82

4.1	Avrupa Kıtası.....	82
4.1.1	Birleşik Krallık.....	84
4.1.2	Avusturya	87
4.1.3	Almanya	88
4.1.4	İspanya	89
4.1.5	Fransa	90
4.1.6	Hollanda	91
4.1.7	İtalya.....	92
4.1.8	Norveç	92
4.1.9	Estonya.....	94
4.1.10	Finlandiya.....	95
4.1.11	Diğer Avrupa Ülkeleri.....	97
4.2	Kuzey Amerika Kıtası.....	100
4.2.1	Amerika Birleşik Devletleri	100

4.2.2	Kanada.....	102
4.3	Asya Kıtası	102
4.3.1	Japonya.....	103
4.3.2	Singapur	105
4.3.3	Çin.....	106
4.3.4	Güney Kore	109
4.3.5	Birleşik Arap Emirlikleri.....	110
BÖLÜM 5		
BIM VE CBS ENTEGRASYONU İÇİN DÖNÜŞÜM YAKLAŞIMLARININ İNCELENMESİ		113
5.1	IFC Veri Modelinin Kavramsal Temelleri.....	114
5.1.1	IFC Veri Modelinin Katmanlı Yapısı ve Temsil Yetenekleri.....	115
5.1.2	Kalıtım Mekanizması	118
5.1.3	IFC Kernel Şeması ve Nesneler Arası Hiyerarşik İlişkiler	120
5.1.4	Semantik İlişkilerin Tanımlanması	122
5.1.5	Veri Aktarımında IDM ve MVD Yaklaşımı	123
5.1.6	IFC’de Konumsal Referanslama ve Koordinat Sistemleri.....	124
5.1.7	IFC Modelinde 3B Geometrik Temsil Teknikleri.....	126
5.1.8	IFC Dosya Formatlarının İçeriği ve Bileşenleri.....	127
5.2	CityGML Standartı ve Veri Yapısının İncelenmesi	128
5.2.1	Modüler Yapısı	128
5.2.2	ADE Mekanizması ve Tematik Uyarlamalar	130

5.2.3	Geometrik Yapısı	130
5.2.4	Konumsal Bilgiler	131
5.2.5	Detay Seviyeleri (LoD)	131
5.2.6	Bina Bileşenlerinin Modellemesi	132
5.2.7	Kodlama Dilleri	133
5.3	LandINFRA Standartı	135
5.3.1	Yapısal Farklılık ve Tematik Kesişimler	136
5.4	CBS ve BIM'in Birlikte Çalışabilirliği	138
5.5	BIM Teknolojisinin CBS ile Entegrasyon Aşamaları	144
5.5.1	Veri Düzeyinde Entegrasyon	146
5.5.1.1	Geometrik Dönüşüm Aşamaları	146
5.5.1.2	Semantik Düzeyde Dönüşüm	156
5.6	BIM ve CBS'nin Entegrasyonunda Veri Aktarım Yaklaşımları	158
5.6.1	Veri Kümesi Tabanlı Yaklaşım	160
5.6.2	Veri Modeli Tabanlı Yaklaşımlar	160
5.6.3	Şema Genişletme Yaklaşımı	161
5.6.4	Sistem Tabanlı Yaklaşımlar	161
5.6.5	Uygulama Tabanlı Yaklaşımlar	162
5.6.6	Hizmet Tabanlı Yaklaşımlar	163
5.6.7	Ontoloji Tabanlı Yaklaşımlar	164
5.6.8	ISO 19166'ya göre Entegrasyon	164
5.6.8.1	B2G-PD: Bilgi Görünümü Tanımı Bileşeni	165

5.6.8.2	B2G-EM: Nesne Eşleme Bileşeni.....	167
5.6.8.3	B2G-LM: Detay Seviyesi Eşleme Bileşeni.....	168

BÖLÜM 6

BIM TEKNOLOJİSİNİN KENTSEL DÖNÜŞÜM VE AFET YÖNETİMİ SÜREÇLERİNE KATKILARININ İNCELENMESİ..... 170

6.1	Türkiye’deki Güncel Kentsel Dönüşüm Çalışmaları	171
6.2	Kentsel Dönüşümde BIM’in Potansiyeli	172
6.3	Kentsel Dönüşümde Çevresel Gereklilikler ve BIM Tabanlı Sürdürülebilirlik Yaklaşımları	179
6.4	Kentsel Dönüşüm Projelerinde Karşılaşılan Temel Sorunlar.....	181
6.5	BIM Teknolojisinin Katkılarına Örnek Çalışmalar	184
6.6	BIM ve CBS Entegrasyonunun Afet Süreçlerindeki Katkıları.....	186
6.6.1	Afet Yönetiminde BIM–CBS Entegrasyonunun Temel Adımları.....	187
6.6.2	Afet Sonrası Hasar Tespiti ve İyileştirme Süreçleri için Uygulama Çerçevesi.....	189
6.7	BIM–CBS Teknikleriyle Afet İzlenmesi, Önlenmesi ve Analizi.....	192
6.7.1	Bina İçi Konum Tespiti ve Tahliye.....	192
6.7.2	Tahliye Planlama ve Rota Optimizasyonu	192
6.7.3	BIM ve CBS Teknikleriyle Sel ve Taşkın Tespiti	193
6.7.4	BIM ve CBS Teknikleriyle Afet Sonrası Hasar ve Maliyet Değerlendirmesi	195
6.8	BIM-CBS Teknikleriyle Bina Yangın Senaryolarının Geliştirilmesi .	201
6.8.1	Yangın Anı İçin Güvenli Tahliye Senaryoları	202

6.8.2	Akıllı Yangın Tahliye Yönetim Sistemi	205

BÖLÜM 7

UYGULAMA

IFC VERİLERİNİN CITYGML FORMATINA DÖNÜŞTÜRÜLMESİ.....	208

7.1 Ön Hazırlık İşlemleri	211

7.1.1 Karmaşık Geometrilerin MultiSurface Yapısına Dönüştürülmesi.....	211

7.1.2 Alt-Üst Nesne Hiyerarşisinin Belirlenmesi	212

7.1.3 CityGML LoD ve Rol Bilgilerinin Tanımlanması.....	214

7.2 IFC Sınıflarından CityGML Nesnelerinin Oluşturulması	214

7.2.1 Building Nesnesinin Oluşturulması	214

7.2.2 Room Nesnesinin Oluşturulması	215

7.2.3 Window Nesnesinin Oluşturulması	216

7.2.4 BuildingPart Nesnesinin Oluşturulması.....	217

7.2.5 BuildingFurniture Nesnesinin Oluşturulması	219

7.2.6 InteriorBuildingInstallation Nesnesinin Oluşturulması	220

7.2.7 Door Nesnesinin Oluşturulması	221

7.2.8 FloorSurface ve RoofSurface Nesnelerinin Oluşturulması.....	223

7.2.9 BuildingInstallation Sınıfının Oluşturulması	224

7.2.10 WallSurface Nesnesinin Oluşturulması	226

7.3 İşlem Adımlarında Kullanılan Transformer Bileşenleri	229

7.3.1 CityGMLGeometrySetter.....	229

7.3.2 VariableSetter.....	231

7.3.3	AttributeCreator	233
7.3.4	Tester.....	233
7.3.5	Attribute Filter.....	234
7.3.6	Attribute Renamer.....	235
7.3.7	Binary Encoder.....	236
7.3.8	Convert Geometry	238
7.3.9	Feature Merger	238
7.4	Dönüşüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	240
7.4.1	IFC Formatındaki Mimari Modelin CityGML’e Dönüşümü	240
7.4.2	IFC Formatındaki Yapısal Modelin CityGML Formatına Dönüşümü 247	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....		251
KAYNAKÇA		259
ETİK KURALLARINA UYGUNLUK BEYANI.....		285
ÖZGEÇMİŞ.....		286

ÖZET

ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI	
Tezin Adı	BIM Teknolojisinin İncelenmesi: CBS Entegrasyonu ve Disiplinler Arası Katkıları
Türü	Coğrafi Bilgi Sistemi Uzmanlık Tezi
Yazar	Esra ÇINAREL KARAPAÇA
Teslim Tarihi	25.08.2025
Anahtar Kelimeler	BIM, CBS, Entegrasyon, Afet, Kentsel Dönüşüm, 3B Bina
Tez Danışmanı	Buket SAĞIROĞLU
Sayfa Adedi	286
İnşaat sektöründeki dijitalleşme, bina verisinin yüksek ayrıntı düzeyinde temsil edilmesini, farklı sistemlerle uyumlu kullanılmasını ve disiplinler arası ihtiyaçlara cevap verebilmesini zorunlu hâle getirmiştir. Bu doğrultuda Yapı Bilgi Modeli (BIM) teknolojileri, farklı disiplinlerin ihtiyaçlarına göre 3B görsel temsilleri düşükten yükseğe değişen ayrıntı seviyelerinde sunmakta ve mimari, yapısal, elektrik gibi modellere ait veriler federe model yaklaşımıyla tek bir ortamda bütünleşik olarak yönetilebilmektedir. Dünya genelinde giderek yaygınlaşan ve bazı ülkelerde zorunlu hâle gelen BIM modelleri, coğrafi referanslanmış olarak CBS platformlarında temsil edildiğinde çok çeşitli analizlere imkân sunacaktır. CBS'nin yüksek doğrulukta, sürekli güncellenen analiz yetenekleri BIM'in potansiyelini artırmakta ve literatürde bu entegrasyonun sağladığı faydaları ortaya koyan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Tasarım, yapım, işletme ve dönüşüm gibi tüm yaşam döngüsü aşamalarında maliyet, sürdürülebilirlik ve zaman yönetimi unsurlarının bütüncül olarak yönetilmesi de bu teknolojilerin sektördeki önemini güçlendirmektedir.	

Bu tez ile söz konusu potansiyeli teknik, stratejik ve uygulama boyutlarıyla ele alarak hem mevcut durumu analiz etmekte hem de gelecekteki entegrasyon çalışmalarına yönelik öneriler geliştirmektedir. Tezde, BIM'in temel kavramları ve ilgili standartlar incelenmiş, TUCBS 3B Bina Teması INSPIRE modeliyle karşılaştırılarak geliştirme önerileri sunulmuş, IFC ve CityGML ile eşleştirilmesi değerlendirilmiştir. Ulusal stratejiler, kurum rolleri ve Türkiye'nin dijital inşaat vizyonu analiz edilmiş, Dünya genelinde BIM politikaları, standartları ve uygulama örnekleri araştırılmıştır. IFC, CityGML ve LandInfra standartlarının yapısal özellikleri detaylandırılmıştır. Sistemik literatür taraması ile BIM-CBS entegrasyon yöntem ve yaklaşımları anlatılmıştır. Ayrıca kentsel dönüşümde dijitalleşme, sürdürülebilirlik, afet yönetimi ve çeşitli senaryolarla BIM-CBS entegrasyonunun katkıları ortaya konmuştur. Son olarak, FME kullanılarak IFC modelinin CityGML formatına dönüşümü uygulanmış ve dönüşüm sonuçları değerlendirilmiştir.

ABSTRACT

MINISTRY OF ENVIRONMENT, URBANISATION AND CLIMATE CHANGE	
Thesis	Investigation of BIM Technology: GIS Integration and Interdisciplinary Contributions
Type	Geographic Information Systems Expertise Thesis
Author	Esra ÇİNAREL KARAPAÇA
Submission Date	25.08.2025
Key Words	BIM, GIS, Integration, Disaster, Urban Regeneration, 3D Building
Advisor	Buket SAĞIROĞLU
Total Page	286
The digital transformation of the construction industry has made it essential to represent building data at a high level of detail, ensure compatibility with different systems, and address the needs of multiple disciplines. In this context Building Information Modeling (BIM) technologies can provide 3D visual representations at varying levels of detail, from low to high, depending on the requirements of different disciplines. Through the federated model approach, data from architectural, structural, and electrical models can be managed in an integrated environment. Globally, BIM is becoming increasingly widespread and has become mandatory in some countries. When georeferenced and represented on GIS platforms with high positional accuracy, BIM models enable a wide range of spatial analyses. The high-accuracy, continuously updated analytical capabilities of GIS further enhance the potential of BIM, as demonstrated by numerous studies in the literature. Managing cost, sustainability, and time in an integrated manner throughout all stages of the building lifecycle—design, construction, operation, and renewal—further strengthens the significance of these technologies in the sector.	

This study addresses the potential of BIM–GIS integration from technical, strategic, and practical perspectives, analyzing the current state and providing recommendations for future integration efforts. The thesis examines the fundamental concepts of BIM and related standards, compares the Turkish National Spatial Data Infrastructure (TUCBS) 3D Building Theme with the INSPIRE model, and presents improvement proposals. The interoperability between IFC and CityGML is evaluated, while national strategies, institutional roles, and Turkey’s digital construction vision are analyzed. Globally, BIM policies, standards, and implementation examples are reviewed, and the structural characteristics of IFC, CityGML, and LandInfra standards are detailed. A systematic literature review is conducted to explain BIM–GIS integration methods and approaches. In addition, the role of BIM–GIS integration in urban transformation, sustainability, disaster management, and scenario-based applications is examined. Finally, the process of converting an IFC model into CityGML format using FME is implemented, and the results of the transformation are evaluated.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince her zaman desteğini hissettiren ve yürütülen süreçte gerekli imkânları sağlayan Genel Müdürümüz Sayın Ömer ALAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Değerli katkıları ve yönlendirmelerinden dolayı Sayın Dr. Akın KISA'ya ve Sayın Emra SERT'e teşekkür ederim. Tez sürecindeki destek ve yol göstericiliği için Sayın Dr. Ahmet DELEN'e içtenlikle teşekkür ederim. BIM ve CBS alanında bana yol gösteren Sayın Prof. Dr. Ümit IŞIKDAĞ'a ve BIM konusundaki tecrübeleriyle bana destek olan tez danışmanım Sayın Buket SAĞIROĞLU'na içtenlikle teşekkür ederim. Bu süreçte en çokta her zaman yanımda olan, sabrı ve sevgisiyle en büyük desteği veren eşime ve aileme en içten teşekkür ve minnetlerimi sunarım. Son olarak, bu süreci kararlılık ve özveriyle tamamlayan kendime de teşekkür ederim.

Esra ÇINAREL KARAPAÇA

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Bina Yaşam Döngüsünde BIM'in Kullanımı	5
Şekil 1.2 BIM Kavramının Öne Çıkan Özellikleri.....	7
Şekil 1.3 BIM'in Federe Model Yapısı.....	8
Şekil 1.4 BIM Yazılımları ile Oluşturulan Modeller	9
Şekil 1.5 LOD Düzeylerinin LOG ve LOIN ile Açıklanması.....	14
Şekil 1.6 Kapı Nesnesine Ait LOG Bilgilerinin Gösterimi	19
Şekil 1.7 LOD Kavramının LOG ve LOIN Kapsamında Gösterimi.....	21
Şekil 2.1 INSPIRE 3B Çekirdek (Core) Bina Modelinin Gösterimi	33
Şekil 2.2 3B Sınır Geometrisine Ait Şema.....	35
Şekil 2.3 CityGML'de Kullanılan 3B Temel Geometrik Öğelerin Gösterimi	35
Şekil 2.4 CityGML 2.0'da LoD Seviyelerinin Gösterimi	36
Şekil 2.5 CityGML 3.0'da LoD Seviyelerinin Gösterimi	36
Şekil 2.6 LoD2, LoD3 ve LoD4'ün UML Şematik Gösterimi	37
Şekil 2.7 Bina Ayak İzi ve Çatı Kenarı İzdüşümlerinin Gösterimi	38
Şekil 2.8 Bina Modelinin LoD0 UML Diyagramı	38
Şekil 2.9 Bina Modelinin LoD1 UML Diyagramı	39
Şekil 2.10 Bina Modelinin LoD2 UML Diyagramı	40
Şekil 2.11 Bina Modelinin LoD3 UML Diyagramı	42
Şekil 2.12 Bina Modelinin LoD4 UML Diyagramı	44
Şekil 2.13 3B Bina Şemasının CityGML ile İlişkisi	46
Şekil 2.14 TUCBS 3B Bina UML Şeması	47
Şekil 2.15 Yapı Modeli Bina 3B Uygulama Şeması.....	50
Şekil 2.16 Cesium Design Tiler BIM Modelinin 3D Tiles Dönüştürülmesi	55
Şekil 2.17 Yapı Modeli- Bina 3B Eşleştirme Şeması	56
Şekil 3.1 PLATO Uygulamasının Genel Görünümü	65

Şekil 3.2 2024 Yılı Birim Faaliyet Raporunda MHGM'nin İlgili Faaliyetleri.....	66
Şekil 3.3 Ulusal BIM Entegrasyonu Çalışmayı Katılımcıları.....	67
Şekil 3.4 Bir Binanın Fotogrametrik ve Mimari 3B Modelinin Gösterimi	69
Şekil 3.5 3B Kadastro Uygulaması	69
Şekil 3.6 Türkiye'nin Ulusal BIM Planı İçin Kısa, Orta ve Uzun Vadeli Eylemler..	78
Şekil 4.1 BIM'in Avrupa'da Zorunluluk Oranını Gösteren Grafik	83
Şekil 4.2 Tasarımında BIM Kullanılan Thames Tideway Tüneli	86
Şekil 4.3 Novorender Bulut Tabanlı BIM Portalı	93
Şekil 4.4 Raylı Sistem Projelerinde Maliyet ve Gecikme Karşılaştırması.....	94
Şekil 4.5 Estonya e-İnşaat Platformu	95
Şekil 4.6 Federal Binanın Yenilenmesinde BIM Kullanımı	101
Şekil 4.7 Yapımında BIM Kullanılan Toho Gauken Müzik Okulu Binası.....	104
Şekil 4.8 CORENET X Yapısının Özeti	105
Şekil 4.9 Çin'de BIM Teknolojisinin Gelişim Tarihi.....	107
Şekil 4.10 Şangay Göğüs Hastalıkları Eğitim-Araştırma Hastanesi BIM Modeli...	108
Şekil 4.11 Tasarım Aşamasında BIM Kullanılan Godeok Köprüsü	110
Şekil 5.1 IFC 4.3 Şemasındaki Katmanların Gösterimi	116
Şekil 5.2 IFC Kalıtım Mekanizması	119
Şekil 5.3 IfcKernel Sınıf Hiyerarşisinin Gösterimi.....	120
Şekil 5.4 Express-G Gösterimiyle IFC Hiyerarşisi	121
Şekil 5.5 IFC Modelindeki Bir Binanın İlişkisel Gösterimi	122
Şekil 5.6 IDM ve MVD ile IFC Verilerinin Aktarımının Gösterilmesi.....	123
Şekil 5.7 IFC'de Coğrafi Referanslama Hiyerarşisi	125
Şekil 5.8 CSG, B-rep, SS 3B Katı Model Örneğinin Gösterimi	126
Şekil 5.9 IFC Dosya Yapısını Gösteren Bir Kesit.....	127
Şekil 5.10 CityGML 3.0 Modüllerinin Genel Görünümü.....	129
Şekil 5.11 Bina nesnesinin ayrıntı düzeylerinin CityGML 3.0 ile gösterimi.....	131

Şekil 5.12 CityGML 3.0 Bina Modülü	133
Şekil 5.13 CityJSON ve CityGML kodlama örnekleri	134
Şekil 5.14 IFC, CityGML ve LandINFRA Standartlarının Tematik Kapsamları	136
Şekil 5.15 IFC, CityGML ve LandInfra Genişletilebilirlik Özellikleri	137
Şekil 5.16 IFC, CityGML ve LandInfra ile Binanın Kavramsal Modellenmesi.....	138
Şekil 5.17 BIM ve CBS Entegrasyonunun Temel Seviyeleri	145
Şekil 5.18 BIM ve CBS Entegrasyon Seviyeleri	145
Şekil 5.19 Geometrik ve Semantik Dönüşüm Aşamalarının Gösterimi	146
Şekil 5.20 Geometrik Dönüşüm Aşamaları	147
Şekil 5.21 Yeryüzündeki Bir P Noktasının Ellipsoid Koordinatları	148
Şekil 5.22 Coğrafi Referanslama İçin Kullanılan IFC Öğeleri	149
Şekil 5.23 IfcMapConversion Koordinat Dönüşümü Denklemi.....	150
Şekil 5.24 Koordinat Dönüşüm Denklemi	151
Şekil 5.25 IFC Yerleştirme Hiyerarşisinin Gösterimi.....	152
Şekil 5.26 LoGeoRef50 UML Diyagramı.....	154
Şekil 5.27 CityGML ve IFC Veri Modellerinin Karşılaştırılması	155
Şekil 5.28 Semantik Dönüşüm Aşamaları	156
Şekil 5.29 IFC Verisini Ayrıştıran Python Kodu ve Tablo Çıktısı	157
Şekil 5.30 BIM'den CBS'ye Dönüşümdeki Veri Aktarım Yolları	159
Şekil 5.31 Kavramsal Eşleme Yapısı ve Bileşenler Arası Etkileşim.....	165
Şekil 5.32 B2G-PD için UML Diyagramı	166
Şekil 5.33 B2G-EM UML Diyagramı.....	167
Şekil 5.34 IFC–CityGML Dönüşümünde LOD Eşlemesinin Yapılışı.....	168
Şekil 5.35 B2GM – LM UML Diyagramı	169
Şekil 6.1 BIM Bazlı Projelerdeki Zorlukların Sınıflandırılması.....	181
Şekil 6.2 Projeye Ait Farklı Disiplin Modelleri.....	185
Şekil 6.3 Projeye Ait Farklı Tasarım Alternatifleri.....	185

Şekil 6.4 BIM ve CBS'nin Afet Yönetimindeki Yetkinlikleri.....	188
Şekil 6.5 Deprem Sonrası Bina İyileştirme Çalışmaları Uygulama Çerçevesi.....	190
Şekil 6.6 Yoğun Yağış Durumunda Sel Riskindeki Alanları Gösteren Harita	194
Şekil 6.7 Taşkın Analizi Yapılan Alan ve Yükseklik Değerleri Haritası	196
Şekil 6.8 Taşkın Simülasyon Görselleştirilmesi	196
Şekil 6.9 Taşkın Noktalarına Göre Oluşturulan Voronoi Diyagramı	197
Şekil 6.10 Binanın CityGML ile Su Altı Kısımlarının 3B Görselleştirilmesi	197
Şekil 6.11 Bina İçindeki Hasar Alan Yerlerin Gösterilmesi	198
Şekil 6.12 Binaya ait Nokta Bulutu ve BIM Verilerinin Birleşimi.....	199
Şekil 6.13 Nokta Bulutu ve BIM Verileri ile Analiz Sonucunun Gösterimi	200
Şekil 6.14 Binanın BIM kesiti ve Eğim Analizi Sonuçları	200
Şekil 6.15 SevenCenter Alışveriş Merkezine Ait BIM Modeli	202
Şekil 6.16 Bina İç Geometrik Ağ Modeli	203
Şekil 6.17 Restoran Yangını Tahliye Senaryosu	203
Şekil 6.18 Aydınlatma Mağazası Yangını Tahliye Senaryosu	204
Şekil 6.19 Lille Üniversitesi Binası BIM Modeli	205
Şekil 6.20 Yangın Anı Isı Haritası – Mutfak Yangını Senaryosu.....	206
Şekil 6.21 Tahliye Rotalarının BIM Ortamında Gösterimi.....	207
Şekil 6.22 BIM Modeli Üzerinden Kullanıcıların Tanımlanması.....	207
Şekil 7.1 Dönüşüm İşlemine Ait İş Akış Şeması	210
Şekil 7.2 FME Üzerinde Geometrilerin Dönüşümü.....	211
Şekil 7.3 IfcDoor Nesnesinin Hiyerarşik İlişkisinin Gösterimi	212
Şekil 7.4 Alt-Üst Nesne eşleştirme Tablosu	213
Şekil 7.5 LoD ve Nesne Rolünün Atanması	214
Şekil 7.6 CityGML Building Nesnesinin Oluşturulması	215
Şekil 7.7 CityGML Room Nesnesinin Oluşturulması	215
Şekil 7.8 CityGML Window Nesnesinin Oluşturulması.....	216

Şekil 7.9 CityGML BuildingPart Nesnesinin Oluşturulması.....	217
Şekil 7.10 IFC Nesnelerinin CityGML Nesnelere Dönüştürülmesi İş Akışı-1.....	218
Şekil 7.11 CityGML BuildingFurniture Nesnesinin Oluşturulması	219
Şekil 7.12 CityGML InteriorBuildingInstallation Nesnesinin Oluşturulması	220
Şekil 7.13 CityGML Door Nesnesinin Oluşturulması	221
Şekil 7.14 IFC Nesnelerinin CityGML Nesnelere Dönüştürülmesi İş Akışı-2.....	222
Şekil 7.15 CityGML 'de FloorSurface ve RoofSurface Nesneleri Oluşturulması....	223
Şekil 7.16 CityGML InteriorBuildingInstallation Nesnesinin Oluşturulması	225
Şekil 7.17 CityGML WallSurface Nesnesinin Oluşturulması	226
Şekil 7.18 IFC Nesnelerinin CityGML Sınıflarına Dönüştürülmesi İş Akışı-3.....	228
Şekil 7.19 CityGMLGeometrySetter Transformer'ın FME'deki Görünümü	229
Şekil 7.20 VariableSetter Transformer FME Görünümü	232
Şekil 7.21 AttributeCreator Transformer FME Görünümü.....	233
Şekil 7.22 Tester Transformer FME Görünümü	234
Şekil 7.23 Attribute Filter Transformer FME Görünümü	235
Şekil 7.24 Attribute Renamer Transformer FME Görünümü	236
Şekil 7.25 Binary Encoder Transformer FME Görünümü.....	237
Şekil 7.26 Binary Encoder_2 Transformer FME Görünümü.....	237
Şekil 7.27 Convert Geometry Transformer FME Görünümü	238
Şekil 7.28 Feature Merger Transformer FME Görünümü	239
Şekil 7.29 IFC Mimari Modelin Gösterimi.....	240
Şekil 7.30 Solibri Anywhere Yazılımı ile Bina Merdiven Detaylarının Gösterimi .	241
Şekil 7.31 Mimari Modelin CityGML Dönüşüm Sonucu.....	241
Şekil 7.32 CityGML Modelindeki Bina Merdiven Detayının Görünümü	242
Şekil 7.33 IFC Formatındaki Yapısal Modelin Farklı Açılardan Görünümü	248
Şekil 7.34 IFC Structural Modelinin Farklı Açılar ile CityGML Gösterimi.....	249

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 LOD100 Gelişim Seviyesi Özellikleri.....	15
Tablo 1.2 LOD 200 Gelişim Seviyesi Özellikleri.....	16
Tablo 1.3 LOD 300 Gelişim Seviyesi Özellikleri.....	17
Tablo 1.4 LOD 350 Gelişim Seviyesi Özellikleri.....	17
Tablo 1.5 LOD 400 Gelişim Seviyesi Özellikleri.....	18
Tablo 1.6 LOD 500 Gelişim Seviyesi Özellikleri.....	19
Tablo 1.7 LOG Seviyelerinin Detaylandırılmış Açıklamalarının Gösterimi	20
Tablo 1.8 BIM Olgunluk Seviyesi 0 Özeti.....	24
Tablo 1.9 BIM Olgunluk Seviyesi 1 Özeti.....	24
Tablo 1.10 BIM Olgunluk Seviyesi 2 Özeti.....	25
Tablo 1.11 BIM Olgunluk Seviyesi 3 Özeti.....	26
Tablo 1.12 Farklı BIM Boyutlarının İncelenmesi.....	27
Tablo 1.13 BIM Platformlarının Özellikleri	28
Tablo 1.14 ISO 19650 Standartlarının Gösterimi	29
Tablo 1.15 BIM ile İlgili Diğer ISO Standartları.....	30
Tablo 1.16 CBS ve BIM ile İlgili ISO Standartları.....	31
Tablo 3.1 Paydaş Katılımına İlişkin Güçlü Yön ve Fırsatlar	74
Tablo 3.2 Paydaş Katılımına İlişkin Zayıf Yönler	75

Tablo 5.1 CBS ve BIM'in Bina Yaşam Döngüsünde Kullanımı	140
Tablo 5.2 CBS–BIM Entegrasyonunun Proje Yönetimi Alanlarına Katkıları.....	142
Tablo 6.1 BIM Teknolojisinin Proje Yaşam Döngüsüne Faydaları.....	174
Tablo 6.2 Kentsel Dönüşüm Projelerinde Karşılaşılan Temel Sorunlar	182
Tablo 6.3 Kentsel Dönüşüm Projelerindeki Sorunlar ve BIM Çözümleri	183
Tablo 7.1 Uygulamada Kullanılan Programlar ve Versiyonları	209
Tablo 7.2 IFC Nesnelerinin Lod ve İşlevsel Değerleri	231
Tablo 7.3 Toplam Okunan IFC Nesne Sayılarını Gösteren Tablo	243
Tablo 7.4 Dönüşüm Sonrası CityGML Çıktı Nesne Sayılarını Gösteren Tablo.....	245
Tablo 7.5 IFC Sınıflarına ile CityGML Sınıflarının Eşleşmesini Gösteren Tablo ..	246
Tablo 7.6 Yapısal Model Nesnelerinin CityGML ile Eşleştirilmesi.....	247

KISALTMALAR

ADE: Uygulama Alanı Uzantısı – Application Domain Extension

AEC: Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat – Architecture, Engineering, and Construction

AR-GE: Araştırma ve Geliştirme – Research and Development

B-REP: Sınır Temsili – Boundary Representation

B2GM: BIM ve CBS Arasındaki Kavramsal Eşleştirme – BIM to GIS Conceptual Mapping

BCF: BIM İş Birliği Formatı – BIM Collaboration Format

BDS: Bina Tanımlama Sistemi – Building Description System

b3dm: Gruplanmış 3B Model – Batched 3D Model

BIM: Yapı Bilgi Modellemesi – Building Information Modeling

BO-IDM: BIM Yönelimli Kapalı Alan Veri Modeli – BIM Oriented Indoor Data Model

BSI: İngiliz Standartlar Enstitüsü – British Standards Institution

BSL: Bina Sahne Katmanı – Building Scene Layer

CAD: Bilgisayar Destekli Tasarım – Computer-Aided Design

CAM: Bilgisayar Destekli Üretim – Computer-Aided Manufacturing

CDE: Ortak Veri Ortamı – Common Data Environment

CBS: Coğrafi Bilgi Sistemleri – Geographic Information Systems

CBSGM: Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü

COBie: İnşaat Operasyonları Bina Bilgi Değişimi – Construction Operations Building Information Exchange

CSG: Yapılandırılmış Katı Geometri – Constructive Solid Geometry

EM: Nesne Eşleme – Element Mapping

EPD: Çevresel Ürün Beyanı – Environmental Product Declarations

ETL: Ayıkla–Dönüştür–Yükle – Extract–Transform–Load

FDA: Sel Hasarı Değerlendirmesi – Flood Damage Assessment

FEMA: Federal Acil Durum Yönetim Ajansı – Federal Emergency Management Agency

GML: Coğrafi İşaretleme Dili – Geography Markup Language

GLIDE: Etkileşimli Tasarım için Grafik Dili – Graphics Language for Interactive Design

GPU: Grafik İşlemci Ünitesi – Graphics Processing Unit

GUID: Küresel Benzersiz Tanımlayıcı – Global Unique Identifier

HVAC: Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme – Heating, Ventilation and Air Conditioning

IAI: Uluslararası İş Birliği İttifakı – International Alliance for Interoperability

IBS: İndekslenmiş 3B Sahne Katmanları – Indexed 3D Scene Layers

IDS: Bilgi Teslim Şartnamesi – Information Delivery Specification

IDM: Bilgi Teslim Kılavuzu – Information Delivery Manual

IFC: Endüstri Temel Sınıfları – Industry Foundation Classes

IFG: Endüstri Temelli Coğrafi Altyapı – Industry Foundation Geospatial

IoT: Nesnelerin İnterneti – Internet of Things

ISO: Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu – International Organization for Standardization

İTÜ SEM: İstanbul Teknik Üniversitesi Sürekli Eğitim Merkezi

LADM: Arazi İdaresi Temel Modeli – Land Administration Domain Model

LCS: Yerel Koordinat Sistemi – Local Coordinate Systems

LEED: Enerji ve Çevresel Tasarımda Liderlik Sertifikası – Leadership in Energy and Environmental Design

LM: Detay Seviyesi Eşleme – LOD Mapping

LOD: Gelişim Düzeyi – Level of Development

LOG: Geometrik Temsil Seviyesi – Level of Geometry

LOIN: Bilgi İçeriği Seviyesi – Level of Information

LoD: Detay Seviyesi – Level of Detail

MHGM: Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü

MTO: Malzeme Metrajı – Material Take-Off

MVD: Model Görünüm Tanımları – Model View Definition

NBS: Ulusal Yapı Şartnamesi – National Building Specification

OGC: Açık Mekansal Konsorsiyum – Open Geospatial Consortium

OpenGL: Açık Grafik Kütüphanesi – Open Graphics Library

OWL: Web Ontoloji Dili – Web Ontology Language

PD: Bilgi Görünümü Tanımı – Perspective Definition

QTO: Metraj ya da Miktar Çıkarımı – Quantity Take-Off

RDF: Kaynak Tanımlama Çerçevesi – Resource Description Framework

RFI: Bilgi Talebi – Formal Request for Information

ŞBM: Şehir Bilgi Modellemesi

SS: Süpürülmüş Katı – Swept Solid

TKGM: Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü

TSE: Türk Standartları Enstitüsü

TUCBS: Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi

UAB: Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı

UBM: Birleşik Bina Modeli – Unified Building Model

WebGL: Web Grafik Kütüphanesi – Web Graphics Library

WFS: Web Özellik Servisi – Web Feature Service

WFS-T: İşlem Tabanlı Web Özellik Servisi – Transactional Web Feature Service

WMS: Web Harita Servisi – Web Map Service

YBM: Yapı Bilgi Modellemesi

GİRİŞ

İnşaat sektöründeki dijitalleşme süreci, farklı disiplinlerin bina verisinden beklentilerini çeşitlendirmiştir. BIM teknolojileri, kullanım amacına bağlı olarak yalnızca görsel 3B temsil sağlamaktan çok daha fazlasını sunabilmekte detaylı bilgi içeriğiyle proje yönetimine, sürdürülebilirliğe, zaman planlamasına ve maliyet kontrolüne katkı sağlamaktadır. Tasarım aşamasında sunduğu görsel olanaklar, disiplinler arası iş birliğini kolaylaştıran yapısı ve revizyon ihtiyacını azaltmasıyla olası maddi kayıpların önüne geçebilmektedir. Modelin coğrafi referanslama ile CBS ortamına aktarılması, konumsal doğruluğu yüksek çok yönlü analizlerin yapılmasını sağlarken altyapı planlamasından afet yönetimine kadar geniş bir kullanım alanı oluşturmaktadır. CBS'nin dinamik yapısı ve yüksek doğruluklu analiz kapasitesi ise BIM verilerinin farklı düzeylerde geliştirilmesine ve yeni kullanım senaryolarının oluşmasına olanak sağlamaktadır.

Birinci bölümde, BIM kavramına ilişkin kapsamlı bir tanım yapılmış ve yapının tüm yaşam döngüsünü kapsayan bütünleşik bilgi yönetim sistemi olarak ele alınmıştır. 1950'lerden 2025'e uzanan tarihsel gelişimi teknik yenilikler, yazılım evrimleri, standartlaşma adımları ve sürdürülebilirlik odaklı dönüşümlerle birlikte özetlenmiştir. LOD kavramı, geometri ve bilgi içeriği bileşenleriyle tanıtılmış LOD100–LOD500 arası seviyelerin kapsamı ile doğruluk, koordinasyon ve maliyet kontrolüne katkıları belirtilmiştir. BIM olgunluk seviyeleri, 3B'den 8B'ye uzanan boyutlar, yaygın platformlar ve ISO 19650 başta olmak üzere uluslararası standartlar ile CBS–BIM entegrasyonu standartları tablo formatında sunulmuştur.

İkinci bölümde, Avrupa Birliği'nin INSPIRE Bina Veri Spesifikasyonu Teknik Kılavuzu (*INSPIRE Data Specification on Buildings – Technical Guidelines*) belgesi TUCBS 3B Bina Teması kapsamında değerlendirilmiştir. Modelin çok katmanlı LoD sistematığına dayalı veri yapısı, semantik bileşenleri ve geometrik temsil yöntemleri incelenmiştir. LoD0–LoD4 seviyelerinin öznitelikleri, UML sınıfları ve mekânsal ilişkileri açıklanmıştır. CityGML 2.0 ile 3.0 sürümlerindeki LoD gösterim farkları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır TUCBS 3B Bina Teması'nın, CityGML ve IFC modelleriyle ilişkisel şemaları incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Son olarak,

TUCBS–BIM entegrasyonunu güçlendirmeye yönelik teknik ve stratejik öneriler geliştirilmiştir.

Üçüncü bölümde, BIM kullanımının ulusal strateji ve politika belgelerindeki yeri ele alınmıştır. Cumhurbaşkanlığı On İkinci Kalkınma Planı, Bakanlık stratejik planları, Ulusal Coğrafi Bilgi Stratejisi, imar mevzuatındaki değişiklikler ve e-Proje Yönetim Sistemi protokolü BIM odaklı olarak değerlendirilmiştir. Bakanlık birimleri, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile İstanbul Büyükşehir Belediyesi gibi kurumların yürüttüğü çalışmalar incelenmiştir. Ulusal BIM Çalıştay çıkartıları, Türkiye’nin BIM entegrasyon sürecine yönelik güçlü ve zayıf yönlerin yanı sıra fırsat ve tehditleri de ortaya koyarak, dijital dönüşümün sadece teknik standartlarla değil kurumsal koordinasyon, mevzuat düzenlemeleri, eğitim süreçleri ve sektörel iş birlikleri ile birlikte ele alınması gerektiğini göstermiştir. BIM’e geçişin teknik ve stratejik altyapısı, karşılaşılan zorluklar ve e-Proje Yönetim Sistemi’ne geçiş aşamaları özetlenmiştir.

Dördüncü bölümde, farklı coğrafi bölgelerden seçilen ülkelerin BIM’e yönelik politika, mevzuat ve uygulama düzeyleri incelenmiştir. Birleşik Krallık, Norveç, Finlandiya, Almanya, Hollanda, Amerika Birleşik Devletleri, Singapur, Japonya, Güney Kore, Çin ve diğer BIM alanında önde gelen ülkeler ele alınarak yasal düzenlemeler, ulusal standartlar, adaptasyon stratejileri ve dijital dönüşüm programları değerlendirilmiştir. Yapılan araştırmalar bu ülkelerin BIM konusundaki mevcut ilerlemelerini ve uygulama eğilimlerini ortaya koymuştur.

Beşinci Bölümde, BIM ve CBS entegrasyonunun temelini oluşturan veri standartları ve dönüşüm yöntemleri ele alınmıştır. IFC’nin kavramsal temelleri, gelişim süreci, katmanlı yapısı, coğrafi referanslama ve 3B geometrik temsil teknikleri açıklanmıştır. CityGML’in geometrik yapısı, detay seviyeleri ve modüler yapısı incelenmiştir. Ayrıca, BIM ve CBS’nin ortak kavramlarını barındıran LandINFRA standardı ayrı bir başlık altında ele alınmıştır. LandINFRA standartının IFC ve CityGML ile yapısal farklılıkları, tematik kapsama alanları ve kesişim noktaları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. CBS ve BIM’in veri, geometrik ve semantik düzeylerde entegrasyonu adım adım aktarılmıştır. Bu kapsamda geometrik temsil dönüşümü, koordinat sistemi dönüşümü, coğrafi referanslama, LOD dönüşümü,

öznitelik çıkarımı, semantik eşleştirme ve birleştirme gibi işlemler örneklerle açıklanmıştır. Bunun yanı sıra, veri kümesi tabanlı, şema genişletme, hizmet tabanlı ve ontoloji tabanlı yaklaşımlar gibi farklı veri aktarım yöntemlerinden örnekler verilmiştir. ISO 19166 standardına dayalı entegrasyon süreci, Nesne Eşleme (B2G-EM), Bilgi Görünümü Tanımı (B2G-PD) ve Detay Seviyesi Eşleme (B2G-LM) bileşenleri üzerinden açıklanmıştır.

Altıncı bölümde, Türkiye’deki güncel kentsel dönüşüm uygulamaları BIM perspektifinden ele alınarak dijitalleşme, planlama ilkeleri ve çevresel gereklilikler bağlamındaki önemi vurgulanmıştır. Kentsel dönüşüm projelerinde sürdürülebilirlik yaklaşımları, karşılaşılan temel sorunlar ve BIM tabanlı çözüm önerileri değerlendirilmiştir. BIM’in proje yaşam döngüsünün farklı aşamalarındaki katkıları ve kullanımda karşılaşılan zorluklar incelenmiştir. BIM–CBS entegrasyonunun afet yönetiminde sunduğu temel yetenekler, risklerin önceden belirlenmesi ve buna bağlı yönlendirme ile tahliye stratejilerinin optimize edilebilmesi açısından değerlendirilmiştir. Bölüm, BIM–CBS entegrasyonunun afet senaryolarındaki rolü ile deprem, sel, taşkın, hasar tespiti ve yangın tahliye senaryolarına ilişkin örnek uygulamaların incelenmesiyle tamamlanmıştır.

Yedinci bölümde, bina modelinin IFC formatından CityGML formatına dönüştürülmesine yönelik iş akışları açıklanmıştır. Süreçte FME Workbench yazılımı kullanılarak geometrik veriler CityGML’in LoD yapısına uyarlanmış, öznitelikler ilgili şemadaki karşılıklarıyla eşleştirilmiş ve kimliklendirme, sınıflandırma ile ilişkilendirme adımları tamamlanmıştır. Dönüşüm sonrasında elde edilen tablolar aracılığıyla IFC ve CityGML nesneleri arasındaki eşleşme oranları gösterilmiş böylece işlemin kapsamı ve başarı düzeyi değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, bu tezde BIM teknolojisi ve CBS entegrasyonunun teknik, yapısal ve stratejik boyutları incelenmiştir. Ulusal ve uluslararası standartlar, politika belgeleri, veri modelleri ve uygulama örnekleri üzerinden kapsamlı bir analiz yapılmıştır. TUCBS 3B Bina Teması’nın CityGML ve IFC ile uyumu değerlendirilmiş, kentsel dönüşüm ve afet senaryolarında BIM–CBS kullanımının sağlayabileceği katkılar ortaya konmuştur. IFC’den CityGML’e veri dönüşüm süreci uygulamalı olarak gerçekleştirilerek entegrasyonun teknik yönü somutlaştırılmıştır.

BÖLÜM 1

BIM TEKNOLOJİSİ, TEMEL KAVRAMLAR VE STANDARTLARIN İNCELENMESİ

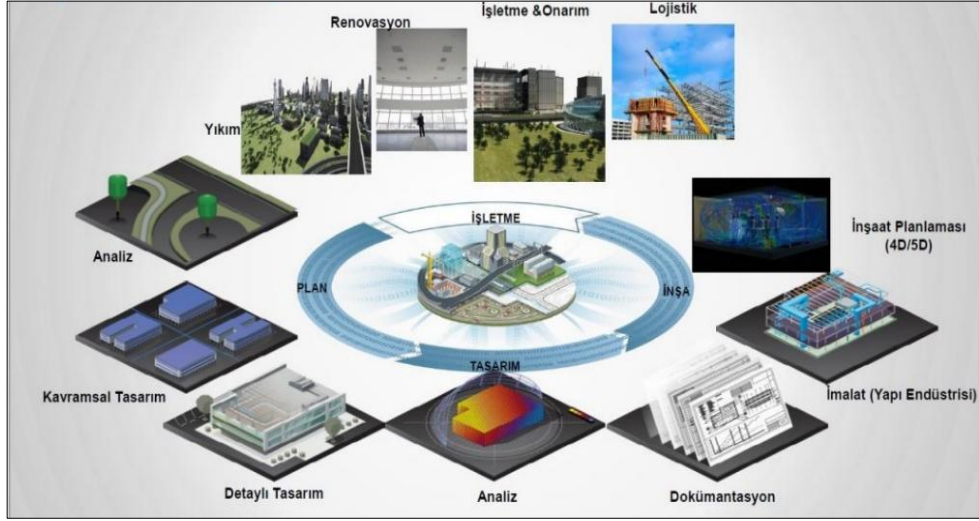
Birinci bölümde, BIM teknolojisinin temel kavramları, tarihsel gelişimi, yapısal bileşenleri ve ilgili standartları sistematik şekilde ele alınmaktadır. İlk olarak BIM'in kavramsal çerçevesi açıklanmış ve parametrik modelleme mantığına dayalı nesne tabanlı dijital temsil yaklaşımı tanıtılmıştır. Ardından BIM teknolojisinin 1960'lerden itibaren gelişen tarihsel süreci, öncü yazılımlar ve kavramsal kırılma noktaları günümüze kadar kronolojik şekilde incelenmiştir. Devamında BIM modellerinde kullanılan gelişim düzeyi (LOD), bilgi içeriği seviyesi (LOIN), geometrik temsil seviyesi (LOG) kavramları açıklanarak bu kavramların disiplinler arası uyum ve proje verimliliği açısından taşıdığı işlevler ortaya konmuştur.

Kurumsal dijitalleşme sürecinde BIM'in benimsenme düzeyini belirleyen olgunluk seviyeleri, Seviye 0'dan Seviye 3'e kadar anlatılmıştır. Her seviyenin iş birliği düzeyi, veri paylaşım yöntemi ve teknik bileşenleri tablolar eşliğinde sunulmuştur. Ayrıca, modelin farklı veri katmanlarıyla zenginleştirildiği BIM boyutları ele alınarak tasarım, zamanlama, maliyet ve işletme gibi süreçlere nasıl entegre edildiği gösterilmiştir. Revit, ArchiCAD, Tekla Structures ve Allplan gibi BIM çalışmalarında yaygın olarak kullanılan yazılımların parametrik modelleme yetenekleri, birlikte çalışabilirlik düzeyleri ve açık veri standartlarıyla olan ilişkileri karşılaştırılmıştır. Bölümün sonunda, BIM süreçlerinin uluslararası düzeyde uyumlu yürütülebilmesi için geliştirilmiş olan ISO 19650 standartları serisi başta olmak üzere, doğrudan BIM ile ilişkili tüm teknik standartlar sınıflandırılarak sunulmuştur. CBS-BIM entegrasyonu kapsamındaki standartlar tablo formatında özetlenmiş ve ilgili içerikler açıklayıcı şekilde aktarılmıştır.

1.1 BIM Teknolojisinin Çok Yönlü Tanımı

BIM'in babası olarak bilinen Charles M. Eastman'a göre BIM terimi hem Bina Bilgi Modeli hem de Bina Bilgi Modellemesi anlamına gelmektedir. İlk kavram zengin içeriklere sahip sanal 3B bina modellerini, ikincisi ise bu modellerin oluşturulma ve işleme sürecini ifade etmektedir [1]. BIM bir yapının fiziksel, işlevsel ve konumsal özelliklerini tasarım, inşaat, işletme ve bakım gibi tüm yaşam döngüsü boyunca (Şekil 1.1), disiplinler arası iş birliğiyle dijital ortamda temsil eden, nesne tabanlı ve semantik ilişkiler içeren bir modelleme ve bilgi yönetim sistemidir [2].

Şekil 1.1 Bina Yaşam Döngüsünde BIM'in Kullanımı [3]



BIM 3B modelleme aracı olmasının yanı sıra çok paydaşlı süreçlerin yönetimini, standartlaştırılmış veri akışını ve buna yönelik karar destek mekanizmalarını bir araya getiren kapsamlı bir dijital platformdur [4]. BIM, inşaat sürecinin tüm aşamalarında görsel öğelerle birlikte yapı elemanlarına ilişkin tanımlayıcı verilerin entegre biçimde yönetilmesini sağlar. Yapı bileşenlerine ait dijital temsilleri sayesinde proje paydaşları arasında ortak bir bilgi akışı gerçekleşir. Böylece karar vericiler için veriler daha şeffaf, erişilebilir ve paylaşılabılır hâle gelir [1].

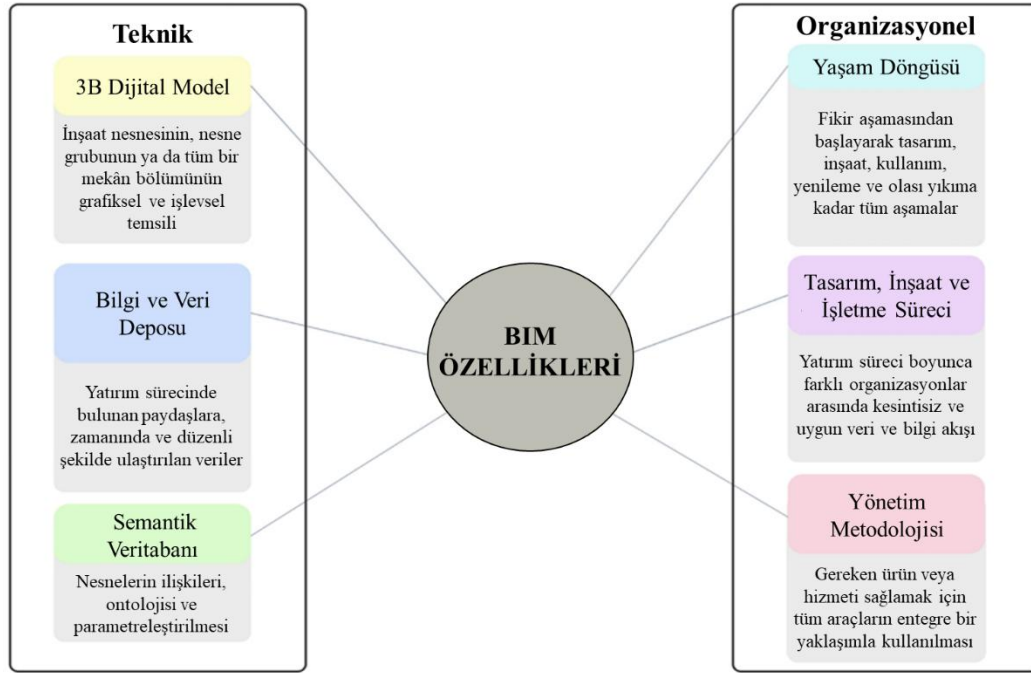
BIM'in temelini oluşturan parametrik modelleme, yapı bileşenlerinin belirli kurallar ve ilişkiler çerçevesinde tanımlanmasını sağlar. Duvar, kolon, döşeme, pencere ve kapı gibi öğeler, nesne tabanlı olarak önceden tanımlanmış kategorilerde sınıflandırılır. Her bir öğe geometri bilgilerine ek olarak katman yapısı, malzeme türü

(ör. tuğla, metal, hava bariyeri), kalınlık, ısı iletim katsayısı, termal kütle ve yüzey dokusu gibi teknik özelliklerle tanımlanır [3]. Nesneler arası ilişkilendirme sayesinde bir bileşende yapılan değişiklik diğer tüm ilgili öğelere otomatik biçimde yansıtılır. Böylece model tutarlılığı ve veri bütünlüğü korunmuş olur. Nesneler farklı detay seviyelerinde tanımlanarak enerji, maliyet, akustik gibi analiz sistemleriyle bütünleştirilebilir [4]. BIM ile otomatik plan, kesit, görünüş üretiminin yanı sıra çakışma kontrolü, performans simülasyonları ve metraj hesapları gibi işlemlerde yapılabilir. BIM modelleri görselleştirme aracı olmakla birlikte kapsamlı bir bilgi sistemidir [3].

Parametrik modelleme, geometrik tanımlar ve yapı elemanlarının davranış ve ilişkilerini birleştirerek daha gelişmiş yapı elemanlarının yani akıllı nesnelerin geliştirilmesini sağlar. Parametrelerle tanımlanan akıllı nesneler bağlamı algılayabilen, diğer bileşenlerle etkileşim kurabilen ve karar süreçlerine katkı sunabilen dinamik varlıklardır. Parametrik nesne altyapısı, BIM içindeki akıllı nesnelere bilgi, ilişki ve davranış yetenekleri kazandırarak modelin işlevselliğini artırır ve yapının dijital temsili yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilir şekilde yönetilebilir hale gelmiş olur. BIM'in parametrik yapısı ve bütünleşik veri paylaşım yetenekleri sayesinde tasarım bilgisinin transferi, özellik optimizasyonu, üretim süreçlerindeki kalite yönetimi, şantiye ekiplerinin koordinasyonu, inşaat kalitesinin denetlenmesi, dokümantasyonun yürütülmesi ve saha kontrolleri gibi pek çok süreç tek bir dijital model üzerinden yönetilebilir [3, 5].

Şekil 1.2'de BIM kavramıyla ilgili öne çıkan altı temel özellik, teknik ve organizasyonel olmak üzere iki grupta sunulmaktadır. Teknik yönler genellikle bilgi kaynağı olan 3B modelle ilgilidir. Organizasyonel boyutta ise BIM'in, yapının tüm yaşam döngüsünü kapsayan bir süreç olarak görüldüğü öne çıkarılmaktadır [6].

Şekil 1.2 BIM Kavramının Öne Çıkan Özellikleri [6]



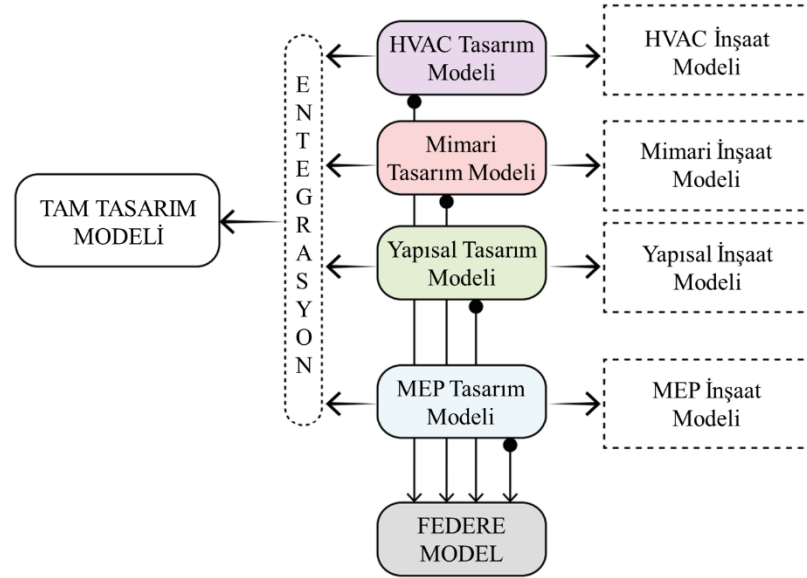
BIM kurumsal dijitalleşmenin temel yapı taşlarından biridir. Sağladığı işlevsellik dijital iş akışlarını dönüştürür, bulut tabanlı veri paylaşımını güçlendirir ve gerçek zamanlı güncellemelerle geliştirilen yeni iletişim biçimlerini destekler [7]. BIM, ISO 19650 ve ISO 29481 gibi uluslararası standartlarla desteklenmekte, buildingSMART tarafından veri (*model*), modelleme (*modeling*) ve yönetim (*management*) olmak üzere üç düzeyde tanımlanmaktadır [8].

BIM modelleri geometrik özellikler, malzeme bilgileri, üretici verileri, performans değerleri, maliyet ve bakım döngüsü gibi zengin veri katmanlarını içerir. Veri zenginliğini birlikte çalışabilir şekilde yönetebilmek için IFC (*Industry Foundation Classes*) ve COBie (*Construction-Operations Building Information Exchange*) gibi açık veri standartları kullanılır. Böylece yazılımdan bağımsız olarak birlikte çalışabilirlik sağlanır ve farklı disiplinler ile veri kaybı yaşanmadan aktarım yapılabilir [8]. İşletme ve bakım aşamalarında, sensör verileriyle güncellenerek dijital ikiz işlevi kazandırılan BIM modelleri, yapının performansını gerçek zamanlı izlemeyi, tahmine dayalı bakım yapmayı ve kaynakları optimize etmeyi sağlar [9].

Günümüzde pek çok ülke BIM'in yaygınlaşmasını destekleyen politika ve süreçler yürütse de bu teknolojinin yaygınlaşmasını engelleyen çeşitli faktörler de bulunmaktadır. Uzman personel eksikliği, lisans yazılımlarının yüksek maliyeti, eğitim yetersizliği ve kurumsal entegrasyon eksiklikleri BIM uygulamalarının adaptasyonunda önemli zorluklar oluşturmaktadır. BIM'in potansiyelinden tam anlamıyla yararlanabilmek için teknik altyapıyla beraber yönetimsel ve kurumsal kapasitenin de eş zamanlı olarak geliştirilmesi gerekmektedir [1].

BIM yeni projelere ek olarak mevcut yapıların da yenilenmesi, genişletilmesi ve sürdürülebilirliği için etkin bir dijital altyapı sunar [10]. Oluşturulan üç boyutlu dijital modeller zaman planlama, maliyet yönetimi, enerji analizi, yaşam döngüsü değerlendirmesi, malzeme optimizasyonu ve atık hacmi tahmini gibi pek çok teknik çıktıyı destekleyerek karar süreçlerini kolaylaştırır [7]. Bina tasarım sürecinin erken aşamalarında alternatif senaryoların değerlendirilmesi, çevresel etkilerin hızlı analizi ve manuel hesaplamaların otomasyonuna imkân tanıyarak sürdürülebilir bir sistem oluşturur [11].

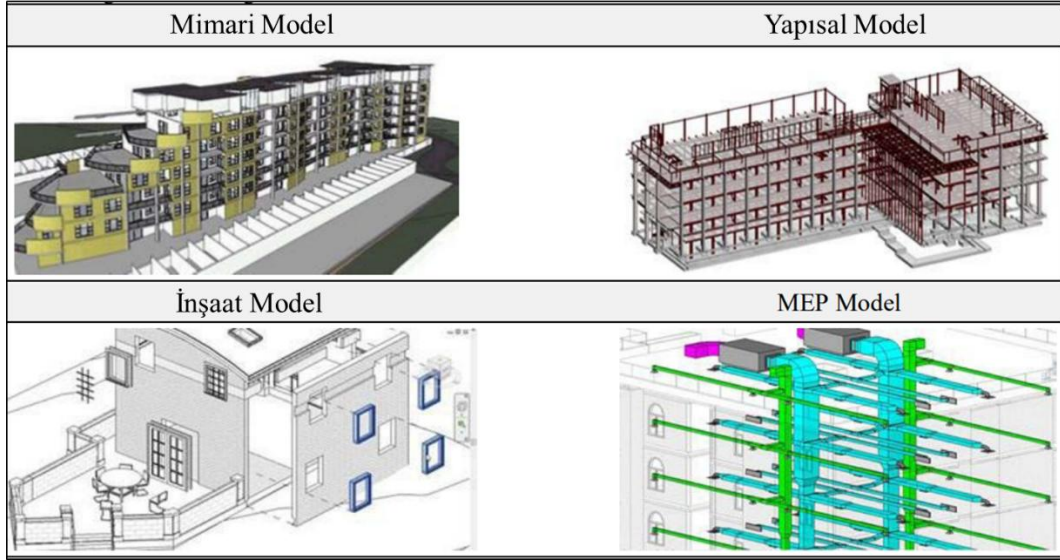
Şekil 1.3 BIM'in Federe Model Yapısı [12]



BIM uygulamalarının etkili şekilde yürütülebilmesi için farklı disiplinlerce hazırlanan modellerin birbirine uyumlu biçimde birleştirilmesi gerekir. Her disiplin, kendi uzmanlık alanına özgü modelleri ayrı ayrı üretir. Ardından bu modeller tüm

verileri ve parametreleri içerecek şekilde bir araya getirilerek “federe model” adı verilen bütünleşik bir yapı oluşturulur (Şekil 1.3). Federe model, tüm disiplinlerin katkılarını tek bir dijital ortamda buluşturan ortak bir veri tabanı işlevi görür [12].

Şekil 1.4 BIM Yazılımları ile Oluşturulan Modeller [4]



Mimarî, yapısal, elektrik, mekanik ve sıhhi tesisat gibi sistemlerin tek bir dijital model üzerinde eş zamanlı olarak tasarlanabilmesi disiplinler arası iş birliğini güçlendirir (Şekil 1.4). Modelde yapılan değişikliklerin tüm ekiplerce güncel olarak takip edilebilmesi, bilgi akışını hızlandırarak kararların daha tutarlı ve verimli biçimde alınmasını sağlar [13].

BIM, tek merkezî bir model üzerinden tüm proje paydaşlarının aynı anda bilgi paylaşmasını sağlayarak, afet senaryoları gibi karmaşık durumlarda veri bütünlüğünü ve operasyonel koordinasyonu güçlendirir. [14]. Deprem, yangın veya sel gibi afet koşulları altında, bina bileşenlerine göre detaylı hasar analizleri yapılmasını sağlar ve bu hasarların mekânsal dağılımı yüksek doğrulukla üç boyutlu olarak görselleştirilebilir [15, 16]. BIM, afet yönetimi uygulamalarında tahliye senaryolarının oluşturulması, yapı performansının izlenmesi ve risklerin önceden simüle edilerek azaltılması gibi kritik işlevleri destekleyerek karar verme süreçlerinde güçlü bir araç olarak öne çıkar [17]. Model üzerinde yapılan her değişiklik tüm analiz alanlarına

otomatik olarak yansıtıldığından, yeniden modelleme ihtiyacını ortadan kaldırarak süreç verimliliğini önemli ölçüde artırır [14].

1.2 BIM'in Tarihsel Gelişim Süreci

BIM teknolojisinin mimarlık, mühendislik ve inşaat alanlarındaki dijitalleşme yolculuğu, 1957'de Dr. Patrick Hanratty tarafından geliştirilen ilk sayısal kontrol temelli üretim yazılımı PRONTO ile başlamıştır [18]. Ardından 1961'de General Motors için geliştirilen ilk bilgisayar destekli otomatik tasarım uygulamaları olan CAD¹ ve CAM² ortaya çıkmış 1962'de Douglas C. Engelbart'ın "İnsanın Zihinsel Kapasitesini Artırmak" adlı çalışmasında nesne tabanlı tasarım, parametrik düzenleme ve ilişkisel veri yapıları gibi BIM'in temel kavramları öne sürülmüştür [19]. 1963'te Ivan Sutherland'ın geliştirdiği Sketchpad yazılımı, grafik kullanıcı arayüzü ile dijital tasarımın önünü açmıştır [18]. 1964'te Christopher Alexander otomatikleştirilebilir tasarım süreçleri ve nesne yönelimli düşünce yapısına dair katkılar sunmuştur [13].

1970'lerin sonlarında 3B nesne modelleme sistemlerinin gelişimiyle dijital mekânsal modelleme olanakları artmıştır. 1974'te Charles Eastman, parametrik nesne kütüphanelerine dayanan ve grafik analizlere izin veren Bina Tanımlama Sistemi (BDS)'ni geliştirmiştir. BDS veri yapıları, sınıflandırma sistemleri ve grafiksel arayüz gibi modern BIM'in birçok temel unsurunu içermekteydi ve Eastman, bu sistemin maliyetleri %50'ye kadar azaltılabileceğini öne sürmüştür. 1975'te yayınladığı makalede bugünkü BIM'in teorik altyapısı detaylandırılmış ve 1977'de ise GLIDE (*Graphics Language for Interactive Design*) sistemiyle grafik tabanlı etkileşimli bir BIM prototipi geliştirilmiştir [13].

1980'lerin başında Gabor Bojar, 3B bina modelleme uygulamaları üzerine çalışmalar yapmış ve 1982'de John Walker liderliğinde kurulan Autodesk, AutoCAD 1.0'ı piyasaya sürmüştür [18]. Aynı yıl Bojar, Macaristan'da ArchiCAD'in ilk versiyonu olan Radar CH'yi geliştirmeye başlamış ve bu yazılım 1987'de ArchiCAD

¹ **CAD (Computer-Aided Design):** Bilgisayar destekli tasarım anlamına gelir ve tasarım süreçlerinin dijital ortamda gerçekleştirilmesini sağlar.

² **CAM (Computer-Aided Manufacturing):** Bilgisayar destekli üretim anlamına gelir ve üretim süreçlerinin bilgisayar aracılığıyla planlanması ve kontrolünü ifade eder.

adıyla yayınlanarak ilk nesne tabanlı BIM yazılımı olmuştur. 1985'te Amerikan yazılım firmaları olan Diehl Graphsoft tarafından geliştirilen Vectorworks ile Parametric Technology Corporation tarafından 1988'de sunulan Pro/ENGINEER³ yazılımları, parametrik modelleme ve çapraz platform desteği ile BIM yönelimli araçlara katkı sağlamıştır [13].

1986 yılında RUCAPS⁴ yazılımı, İngiltere'de bulunan Heathrow Havaalanı'nın Terminal 3 projesinde kullanarak BIM uygulamalarının sahadaki ilk örneklerinden biri olmuştur. 1987'de ArchiCAD "sanal bina" kavramıyla yeniden yapılandırılmış 1993'te Building Design Advisor, simülasyon temelli analiz sunan ilk BIM yazılımlarından biri olarak geliştirilmiştir. 1994'te Mapsoft firmasının miniCAD yazılımı taşınabilir cihazlar için ilk CAD uygulaması olmuştur [13].

2000 yılında Irwin Jungreis ve Leonid Raiz tarafından geliştirilen Revit, parametrik değişiklik motoru ve 4B özellikleriyle BIM sürecine zaman boyutunu entegre etmiş ve sektörde devrim yaratmıştır. 2002 yılı itibarıyla "BIM" terimi, sanal tasarım ve tesis yönetimini tanımlamak için resmen kullanılmaya başlanmış aynı yıl Jerry Laiserin, bu terimi akademik ve sektörel yayınlarında popülerleştirmiştir [18]. Laiserin BIM'i, bir yapının yaşam döngüsü boyunca bilgiye çok boyutlu erişim sağlayan dijital bir temsil süreci olarak tanımlamıştır [13].

2012 yılında buildingSMART, BIM'in birlikte çalışabilirliğini artırmak amacıyla openBIM yaklaşımını duyurmuş ve BCF (*BIM Collaboration Format*) standardını yayımlayarak açık veri paylaşımı konusunda önemli bir adım atmıştır [19]. 2013 yılında IFC veri formatı, ISO 16739 standardı olarak kabul edilmiştir [18]. 2015 yılında "Yeşil BIM" kavramı dikkat çekmiş, BIM'in karbon azaltımı ve enerji verimliliği hedeflerine katkısı hem akademik hem sektörel alanda tartışılmıştır [20]

2017 yılında AB destekli EU BIM Task Group, kamu ihalelerinde BIM kullanımını yönlendirmek amacıyla BIM Uygulama El Kitabı yayımlamıştır [15].

³ **Pro/ENGINEER**, mühendislik tasarımlarında kullanılan ilk ticari parametrik modelleme yazılımıdır. Kullanıcının yaptığı değişikliklerin modele bağlı tüm öğelere otomatik olarak yansımaları sağlar. Günümüzdeki birçok BIM ve CAD sisteminin temelini oluşturur.

⁴ **RUCAPS**, 1970'lerin sonu ile 1980'lerin başında geliştirilmiş olan ve bina tasarım süreçlerini dijitalleştirmeyi amaçlayan, erken dönem BIM özellikleri taşıyan bir CAD yazılımıdır.

2018 yılı, ISO 19650-1 ve 19650-2 standartlarının yayımlanması ve Autodesk–ESRI iş birliği ile BIM–CBS entegrasyonunun duyurulmasıyla dikkat çekmiştir [7]. 2019’da Autodesk, BIM uygulamalarını tek çatı altında toplayan Autodesk Construction Cloud platformunu tanıtarak projelerde ortak veri ortamı kullanımını yaygınlaştırmıştır [11].

2020 yılı, pandemi etkisiyle BIM’in dijital iş birliği kapasitesinin ön plana çıktığı bir dönem olmuş ve birçok ekip bulut tabanlı platformlara yönelmiştir. Aynı yıl ISO 19650-3 yayımlanarak bilgi yönetimi süreçleri detaylandırılmıştır [10]. 2021’de kurulan Global BIM Network⁵, 40’tan fazla ülkenin katılımıyla uluslararası stratejik bir yol haritası yayımlamıştır [11]. 2022 yılında BIM yapay zekâ, gerçek zamanlı simülasyon ve sürdürülebilirlik alanlarında gelişmiş, IFC5 çalışmalarına başlanmıştır [15]. 2023’te ISO 19650-6 yayımlanarak iş sağlığı ve güvenliğinin dijital ortamda yönetimi tanımlanmıştır [21].

Son olarak 2025 yılında yürürlüğe giren ISO 22057 ile Çevresel Ürün Beyanı (*Environmental Product Declarations, EPD*) belgelerinin doğrudan BIM modellerine bağlanmasını sağlayarak karbon hesaplamalarının standartlaştırılmasına öncülük etmiştir [9]. Tüm bu gelişmeler BIM’in yalnızca bir modelleme teknolojisi olmadığını göstererek sürdürülebilirlik, iş birliği ve dijital dönüşüm açısından stratejik bir altyapı haline geldiğini ortaya koymuştur.

1.3 BIM’in Kavramsal ve Yapısal Temelleri

1.3.1 Gelişim Düzeyi (LOD)

LOD (*Level of Development*) kavramı, sanal ortamların geliştirilmesinde sistem performansını dengeli kullanabilmek amacıyla uzun süredir kullanılmaktadır [22]. Türkçe karşılığı “gelişim düzeyi” olarak çevrilmektedir [23]. 2005 yılında mimarlık, mühendislik ve inşaat sektörü için çok önemli olan semantik ve geometrik bilgilerin beş düzeyde tanımlandığı ilk LOD spesifikasyonu Vico Software tarafından yayımlanmıştır. Aynı yıl Amerikan Mimarlar Enstitüsü (*The American Institute of*

⁵ **Global BIM Network**¹, 2021 yılında kurulan ve dünya genelindeki kamu otoriteleri, sektör temsilcileri ve uluslararası kuruluşları bir araya getiren bir iş birliği platformudur. Amacı, yapılı çevrenin dijitalleşmesini desteklemek, BIM uygulamalarında stratejik uyumu artırmak ve bilgi paylaşımını küresel ölçekte yaygınlaştırmaktır.

Architects-AIA), bu sınıflandırmayı geliştirerek LOD 100'den LOD 500'e kadar uzanan beş gelişim düzeyini tanımlamıştır. 2013 yılından itibaren ise BIMForum, bu sistematığı daha da detaylandırarak LOD 350 seviyesini tanımlamış ve her yıl güncel LOD Spesifikasyonu yayımlayarak farklı disiplinlerin aynı modeli aynı anlamda yorumlayabilmesini amaçlamıştır [24]. BIMForum'un 2024 LOD Spesifikasyonu dokümanında, kolon, kiriş, duvar ve pencere gibi sık kullanılan yapı bileşenlerinin her bir LOD seviyesi metinsel ve grafiksel olarak detaylı biçimde sunulmuştur. Her öge için temsil düzeyi, bilgi içeriği ve kullanım amacı ayrı ayrı açıklanmış böylece tasarım, planlama ve inşaat süreçlerinde modelin hangi aşamada ne amaçla ve ne düzeyde kullanılabileceğine ilişkin net bir çerçeve oluşturulmuştur [25].

LOD sisteminin mantığı, bir modelin geometrisi ile birlikte içerdiği bilginin zamanla nasıl geliştiğini tanımlamak ve bu verilerin güvenilirlik düzeyini ortaya koymaktır. Mühendis ve tasarım ekipleri modelin hangi detay seviyesinde olduğunu belirtebilir ve böylece modelin kullanım amacına ve sınırlarına ilişkin net bir iletişim zemini oluşur [24]. Süreç boyunca hem geometrik hem de semantik bilgi derinliğini içeren bu yapı ile disiplinler arası koordinasyon kolaylaştırılarak proje sürecinin daha verimli ve uyumlu ilerlemesinin sağlar [26].

LOD kavramı iki temel bileşenle ele alınmalıdır. Birincisi “Geometrik Temsil Seviyesi (*Level of Geometry, LOG*)”, ikincisi ise “Bilgi İçeriği Seviyesi (*Level of Information, LOIN*)” bileşenidir. Yani “ $LOD = LOG + LOIN$ ” şeklinde formüle edilebilir. BIM modelinin gelişim düzeyi, görsel doğruluk (LOG) ve bilgi derinliği (LOIN) birlikte ele alındığında modelin ilerleme aşaması ve güvenilirliği kullanım amacına göre şekillendirilebilir (Şekil 1.5) [27].

Şekil 1.5 LOD Düzeylerinin LOG ve LOIN ile Açıklanması [27]

	LOD 100	LOD 200	LOD 300/350	LOD 400	LOD 500
	Kavramsal Tasarım	Şematik Tasarım	Planlama	Uygulama	İşletme ve Bakım
	CBS Haritaları, Kütleler 2B Semboller	Kısmen Tanımlı Geometri; Boyut, Şekil, Konum, Yönelim	Kesin/Detaylı Geometri; Boyut, Şekil, Konum, Yönelim, Bağlantılar	LOD 300/350 + imalat için ek geometri (delikler, kaynaklar, çiviler, somunlar, civatalar, vida boyutları)	LOD 400 + Tüm nesneler yerinde inşa edilmiş ve kurulmuş
LOG					
+					
LOIN	• Adı • Nesne Türü • Alan Ölçümleri • Kullanıcı Gereksinimleri • Yönetici Özeti • Belediye Verileri • Yapı Yönetmelikleri	• LOI 100 • Ölçümler • Malzemeler • Miktarlar • Koordinasyon ve Çakışmalar	• LOI 200 • Maliyetler, Teklifler ve Sözleşmeler • Zaman Çizelgeleri • Yangın Dayanım Sınıfı • Teknik Analiz • Enerji Analizi • Çevresel Etki Değerlendirmesi	• LOI 300/350 • İmalat/Üretim • Teslimat • Montaj/Kurulum • İş Sağlığı ve Güvenliği • Kalite Güvencesi • Kalite Kontrolü	• LOI 400 • Devir Teslim • Bakım • Yapı Performansı • Kullanım Verileri • Kullanımın Sona Ermesi

1.3.2 LOD 100'den LOD 500'e Gelişim Düzeylerinin Gösterimi

Bu başlık altında, LOD seviyelerinin kapsamı ayrıntılı biçimde açıklanacak ve bir BIM modelinde yer alan yapısal, elektriksel, mimari, iç mekân, mekanik ve dikey taşıma sistemlerine ilişkin öğelerin her bir gelişim düzeyindeki içerikleri tablo formatında karşılaştırmalı olarak gösterilecektir.

1.3.2.1 LOD 100 Seviyesi – Ön Tasarım

LOD 100 seviyesinde (*pre-design*), model öğeleri sadece temel semboller ya da kütsel formlar aracılığıyla gösterilir. Geometrik olarak gerçek bir nesneye karşılık gelmezler. Çoğunlukla alan, maliyet ya da sistem kapasitesi gibi bilgilerin yaklaşık değerlerle modellenmesini sağlarlar. Buradan elde edilen tüm veriler tahmine dayalıdır ve netlik taşımaz. Erken ya da ön tasarım aşamasında işbirlikçilerin karar almasını kolaylaştırır ama kesin mühendislik hesapları için kullanılamazlar (Tablo 1.1) [26,28,29].

Tablo 1.1 LOD100 Gelişim Seviyesi Özellikleri [26,28,29]

Model	Açıklama
Yapısal (Structural)	Yapısal model, sadece bina kütseli veya kolon aksları gibi sembolik öğelerle gösterilir. Eleman boyutları ve konumları belirgin değildir, yalnızca yaklaşık bir yapısal düzeni ima eder.
Mimari (Architectural)	Mimari model, genel bina formunu veya ana hacimleri üç boyutlu kütleler şeklinde sunar. Mekânlar ve bina elemanları tam tanımlanmaz. Sadece alan, yükseklik, hacim, konum gibi yaklaşık bilgiler verilir.
İç Mekân (Interior Construction)	İç mekân düzeni bu aşamada genellikle belirlenmez veya yalnızca kabaca bir alan planlaması olarak öngörülür. Mobilya ve bölme duvar gibi unsurlar basit bloklar/simgeler halinde temsil edilir.
Mekanik (HVAC)	HVAC sistemi kavramsal düzeyde temsil edilir. Kanallar, borular ve cihazlar modelde yer almaz veya sadece temsili kütleler şeklinde öngörülür.
Elektrik (Electrical)	Elektrik sistemi ayrıntılı gösterilmez. Genel elektrik yükü ihtiyaçları veya temel altyapı varsayımları tanımlanabilir ancak modelde sadece sembolik göstergeler olabilir.
Dikey Taşıma (Conveyance)	Dikey taşıma sistemleri konsept olarak düşünülür ancak ayrıntılı bir eleman bulunmaz. Sadece kabaca bir şaft yeri veya gerekli hacim ayrımı belirtilir.

1.3.2.2 LOD 200 – Şematik Tasarım

LOD 200 seviyesinde (*schematic design*), model öğeleri artık belirli bir sistemin, bileşenin ya da montajın yaklaşık boyut, şekil, yön ve konum bilgilerini içerir. Ancak bu bilgiler hâlâ genel geçer niteliktedir ve yüksek doğruluk aranmaz. Temsiller genellikle kütüphanelerden alınmış genel objelerdir ve öğelerin nihai hâlini tam olarak yansıtmaz. Grafik olmayan bilgiler de modele eklenebilir yine de buradan çıkarılan veriler yaklaşık olarak değerlendirilmelidir (Tablo 1.2) [26,28,29].

Tablo 1.2 LOD 200 Gelişim Seviyesi Özellikleri [26,28,29]

Model	Açıklama
Yapısal (Structural)	Yapısal elemanlar yaklaşık boyut, konum ve yerleşimle modellenir. Genel bir yapısal sistem ve taşıyıcı elemanlar belirlenmiştir.
Mimari (Architectural)	Duvarlar, çatılar ve açıklıklar gibi mimari öğeler üç boyutlu olarak modellenmiştir. Boyutlar ve yerleşimler yaklaşık verilerdir.
İç Mekân (Interior Construction)	Bölme duvarlar ve bazı iç mekân unsurları yaklaşık boyut ve konumla yer alır. Malzeme ve detaylar net değildir.
Mekanik (HVAC)	Mekanik sistemler için ana ekipmanlar ve kanallar yerleştirilmiştir. Amaç, alan gereksinimini test etmektir.
Elektrik (Electrical)	Armatürler, panolar ve temel elektrik ekipmanları yaklaşık konumda yer alır. Yerleşim ve bağlantılar değişebilir.
Dikey Taşıma (Conveyance)	Asansör ve merdiven gibi taşıma elemanları yaklaşık boyut ve konumla modellenmiştir. Nihai sistem temsil edilmez.

1.3.2.3 LOD 300 – Tasarım Geliştirme

LOD 300 seviyesinde (*design development*), model öğeleri projede kullanılacak gerçek sistem bileşenlerini temsil edecek düzeyde detaylandırılır. Boyut, şekil, konum, yönelim ve miktar gibi tüm fiziksel bilgiler netleşmiş ve doğru şekilde modellenmiştir. Maliyet, üretici bilgisi gibi veriler de modele entegre edilebilir. Model artık, uygulamaya yönelik kararlar ve mühendislik hesaplamaları için yeterli doğruluk seviyesine ulaşmıştır (Tablo 1.3) [26,28,29].

Tablo 1.3 LOD 300 Gelişim Seviyesi Özellikleri [26,28,29]

Model	Açıklama
Yapısal (Structural)	Kiriş, kolon ve döşeme gibi yapısal elemanlar gerçek boyut ve konumlarıyla modellenmiştir. Çakışma kontrolü için uygundur.
Mimari (Architectural)	Duvar kalınlıkları, katmanları, pencere ve kapılar doğru yerleştirilmiştir. Malzeme ve boyutlar kesinleşmiştir.
İç Mekân (Interior Construction)	İç duvarlar, kaplamalar ve sabit mobilyalar doğru ölçü ve konumda modellenmiştir. İnşaat öncesi doğruluk sağlar.
Mekanik (HVAC)	Havalandırma kanalları, ekipmanlar ve bağlantı elemanları mühendislik verileriyle modellenmiştir. İzolasyon payları gösterilir.
Elektrik (Electrical)	Panolar, kablo tavaları, priz ve armatürler doğru konumda yerleştirilmiştir. Erişim alanları belirtilmiştir.
Dikey Taşıma (Conveyance)	Asansör ve merdiven boşlukları gerçek ölçüleriyle modellenmiştir. Statik ve erişim koşulları dikkate alınmıştır.

1.3.2.4 LOD 350 – İnşaat Dokümantasyonu

LOD 350 (*construction documentation*) ile birlikte model öğeleri sadece kendi içinde temsil edilerek diğer sistemlerle olan ilişkileri öne çıkarılır. Farklı disiplinlerin öğeleri ile çakışma ya da entegrasyon noktaları modelde gösterilir. Sahada montaj sırasında ortaya çıkabilecek koordinasyon sorunlarını azaltır (Tablo 1.4) [26,28,29].

Tablo 1.4 LOD 350 Gelişim Seviyesi Özellikleri [26,28,29]

Model	Açıklama
Yapısal (Structural)	Kiriş, kolon ve döşemeler yalnızca boyut ve konum açısından değil, aynı zamanda mimari ve mekanik sistemlerle olan kesişim noktaları da belirtilerek modellenmiştir. Montaj sırasında çakışma tespiti kolaylaştırılmıştır.
Mimari (Architectural)	Duvarlar, pencereler ve kapılar yapısal ve mekanik öğelerle olan ilişkileriyle birlikte gösterilmiştir. Katmanlar arası koordinasyon detaylıdır.
İç Mekân (Interior Construction)	İç duvarlar ve sabit mobilyalar yalnızca kendi doğruluklarıyla değil, elektrik ve mekanik sistemlerle olan entegrasyon noktaları da belirgin şekilde modellenmiştir.
Mekanik (HVAC)	Kanal, ekipman ve bağlantılar yalnızca kendi boyut ve konumlarıyla değil, mimari ve yapısal öğelerle çakışma alanları açıkça gösterilerek modellenmiştir. Montaj koordinasyonunu destekler.
Elektrik (Electrical)	Panolar, prizler ve kablo tavaları diğer sistemlerle olan bağlantı noktalarıyla birlikte gösterilmiştir. Çakışma analizi için gerekli bilgiler modele entegre edilmiştir.
Dikey Taşıma (Conveyance)	Asansör ve merdiven boşlukları yalnızca ölçüleriyle değil, yapısal ve mimari sistemlerle olan kesişimleriyle birlikte modellenmiştir. Montaj sürecinde koordinasyon kolaylaştırılmıştır.

1.3.2.5 LOD 400 – İnşaat Aşaması

LOD 400 seviyesinde (*construction stage*) model, artık üretim ve montaj sürecine doğrudan temel oluşturabilecek ayrıntıya ulaşır. Modeldeki öğeler, sahada nasıl kurulacaklarsa o şekilde detaylandırılır. Bağlantı elemanları, askı sistemleri ve yapısal birleşim gibi özel detaylar bu düzeydeki modele eklenir. Her bileşen kullanılacağı haliyle modellenmiş olur ve üreticiye ait teknik bilgiler de dâhil edilir. Böylece model, imalat ve uygulama sürecine doğrudan aktarılabilecek nitelikte olur (Tablo 1.5) [26,28,29].

Tablo 1.5 LOD 400 Gelişim Seviyesi Özellikleri

Model	Açıklama
Yapısal (Structural)	Parçaların birbirine monte edileceği plakalar, sabitleme elemanları ve yapı içindeki demir donatıların yerleşimi gibi detaylar modele eklenmiştir. Ayrıca, üretim ve sahada kurulum için gerekli bilgiler de modele dâhil edilmiştir.
Mimari (Architectural)	Üreticiye özgü pencere, kapı ve cephe detayları gösterilir. Montaj detayları mevcuttur.
İç Mekân (Interior Construction)	Tüm iç kaplama ve sabit mobilya sistemleri montaj detaylarıyla temsil edilir.
Mekanik (HVAC)	Bağlantı parçaları, taşıyıcı askılar ve destek aparatları modele eklenmiştir. Elemanların yerleşimi için gerekli alanlar ve bakım ya da müdahale için bırakılması gereken boşluklar da modellenmiştir.
Elektrik (Electrical)	Elektrik panosu, bağlantı ekipmanları, montaj braketleri ve montaj bilgileri detaylıdır.
Dikey Taşıma (Conveyance)	Asansör sistemleri üretim çizimlerine uygun olarak modellenmiştir. Tüm bağlantı ve yerleşim detayları verilir.

1.3.2.6 LOD 500 – İnşa Edilmiş Model

LOD 500 seviyesi (*as-built*), bir model ögesinin sahada inşa edilmiş ve doğrulanmış son hâlini temsil eder. Boyut, şekil, konum, miktar ve yön gibi tüm bilgiler, gerçek yapıdaki öğelerle tam olarak uyumludur. Ancak her ögenin bu ayrıntı düzeyine ulaşması gerekmez. LOD 500 seviyesinde model bina işletmesi, bakım ve mülkiyet yönetimi gibi süreçlerde güvenle kullanılabilecek kesin bir dijital kaynaktır (Tablo 1.6) [26,28,29].

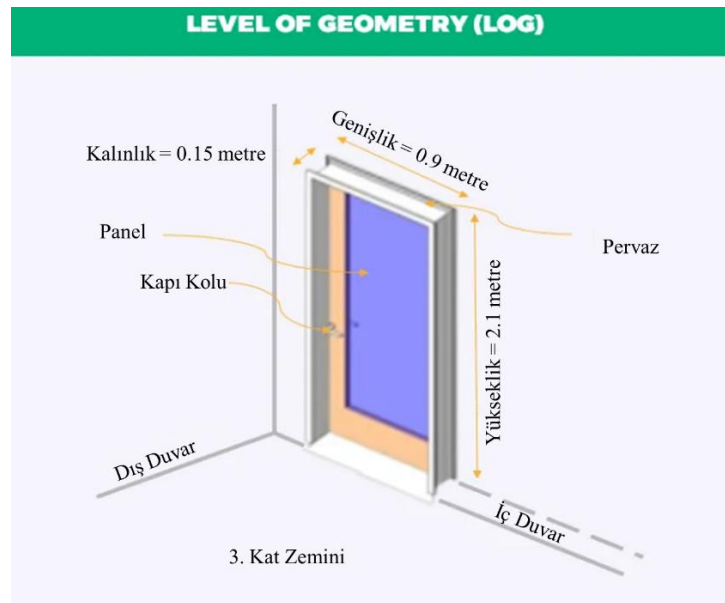
Tablo 1.6 LOD 500 Gelişim Seviyesi Özellikleri [26,28,29]

Model	Açıklama
Yapısal (Structural)	Sahada doğrulanmış yapısal elemanlar modelde nihai yerleri, boyutları ve montaj şekliyle temsil edilir.
Mimari (Architectural)	Duvar, kapı, pencere gibi mimari öğeler yerinde ölçülerek modele işlenir. Gerçekle birebir uyumludur.
İç Mekân (Interior Construction)	Uygulamada kullanılan malzeme ve montaj bilgileri doğrultusunda güncellenmiş iç mekân temsildir.
Mekanik (HVAC)	Tesisat ve mekanik sistemler yerinde yapılan ölçümlerle doğrulanmıştır. Erişim alanları ve bağlantılar netleştirilmiştir.
Elektrik (Electrical)	Kablo, priz, pano gibi elektrik bileşenleri sahada ölçülerek nihai konumlarında modele işlenmiştir.
Dikey Taşıma (Conveyance)	Asansörler, yürüten merdivenler vb. sistemler sahada doğrulanmış yerleşim ve özelliklerle modellenmiştir.

1.3.3 Geometrik Temsil Seviyesi (LOG)

LOG kavramı, bir BIM modelinde yer alan nesnelerin biçimsel olarak ne kadar detaylandırıldığını ifade eder. Yani bir elemanın şekli, konumu ya da yönelimi gibi fiziksel özelliklerinin modelde ne derece hassas ve ayrıntılı biçimde temsil edildiğini gösterir. Örneğin bir kapı en basit haliyle yalnızca kutu biçiminde modellenebilirken, daha ileri seviyelerde çerçevesi, kanadı, kolu ve bağlantı detayları da dâhil edilerek çok daha gerçekçi biçimde tanımlanabilir (Şekil 1.6) [25].

Şekil 1.6 Kapı Nesnesine Ait LOG Bilgilerinin Gösterimi [27]



Son yıllarda her bir gelişim düzeyini görsel olarak temsil eden grafiksel katalogların kullanımı yaygınlaşmıştır. Kataloglar modelleme yapan profesyonellere süreç boyunca yol göstererek model kalitesini yükseltir. BIMForum yapı bileşenlerine özel LOD seviyelerini gösteren kapsamlı görsel referanslar yayımlamıştır [25]. Tablo 1.7’de, BIM süreçlerinde yaygın olarak kullanılan geometrik detay seviyesi tanımları özetlenmiştir. Bu seviyeler yapı elemanlarının modelleme sürecinde kazandığı geometrik doğruluk düzeylerini belirtmek amacıyla geliştirilmiştir [30].

Tablo 1.7 LOG Seviyelerinin Detaylandırılmış Açıklamalarının Gösterimi [30]

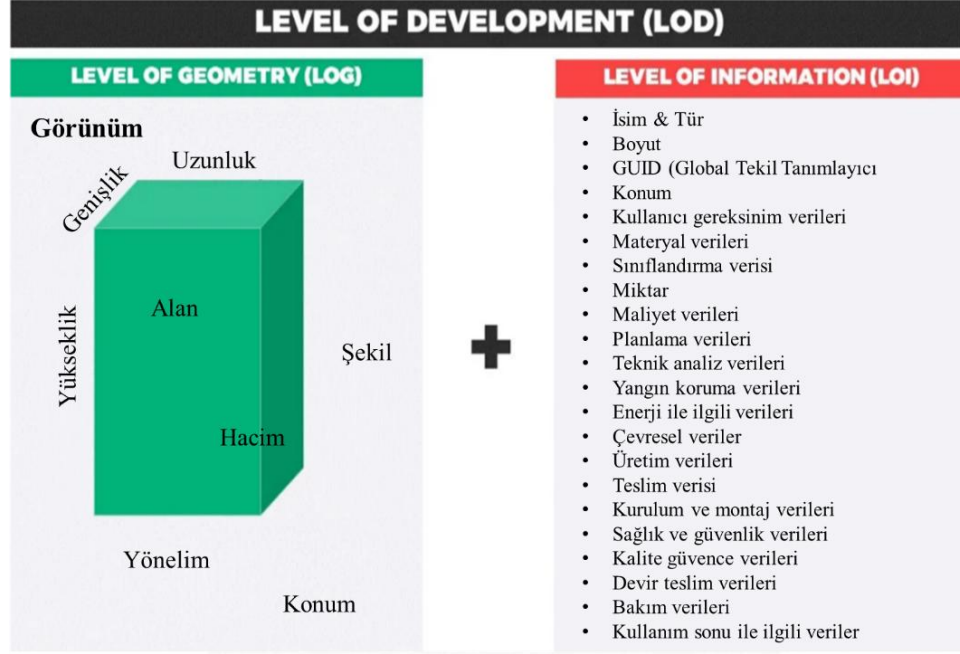
Seviyeler	Temsil	Açıklama
LOG100	Kütlesel Temsil	Yapı elemanları yalnızca yaklaşık konum, boyut ve şekli yansıtan basit kütleler olarak modellenir. Bu düzeyde detaydan çok genel yerleşim ve oranlar ön plandadır.
LOG200	Şematik Geometri	Elemanlar temel biçimsel özellikleriyle temsil edilir. Alan, yükseklik, hacim gibi ölçütler tahmini veya standart değerlere dayalıdır. Geometrik doğruluk düşüktür, ancak tasarım amacını aktarmak için yeterlidir.
LOG300	Kesin Geometri	Modeldeki elemanlar gerçek boyutlarına ve fiziksel özelliklerine uygun şekilde detaylandırılır. Üretime ve uygulama projelerine temel oluşturacak düzeyde hassas geometri içerir.
LOG400	Detaylı Geometri (İmalat Temelli)	Yapı elemanları üretici verileri, montaj detayları ve bağlantı elemanlarıyla birlikte yüksek doğrulukta modellenir. Model, yapım sürecinde kullanılabilecek seviyededir.
LOG500	Tamamlanmış Model Geometrisi (As-Built)	Model, tamamlanmış yapının sahadaki nihai durumunu birebir yansıtacak şekilde oluşturulur. Tüm bileşenler doğrulanmış ölçülerle ve uygulamadaki son halleriyle temsil edilir.

1.3.4 Bilgi İçeriği Seviyesi (LOIN)

LOIN, modeldeki öğelerin taşıdığı anlamlı bilgileri, yani semantik içeriği ifade eder. Bir yapı elemanına ait ad, tür, malzeme, üretici, teknik özellikler ya da bakım gibi sayısal ya da tanımlayıcı tüm bilgiler bu kapsama girer. LOIN verileri genellikle tablo halinde sunulur ve her öğe türü için hangi bilgilerin gerekli olduğu sistemli şekilde belirtilir. Örneğin BIMForum tarafından hazırlanan LOD tanımlarında, geometrik düzeyler ve her seviyede bulunması gereken temel bilgi içerikleri de

tanımlanır [31]. Ardından her bir özelliğin veri tipi ve örnekleriyle birlikte detaylı tablolar halinde sunulurken kullanıcılar yol gösterilir [27].

Şekil 1.7 LOD Kavramının LOG ve LOIN Kapsamında Gösterimi [27]



Şekil 1.7, LOG ve LOIN kavramlarının daha iyi anlaşılabilmesi için güzel bir örnek sunar. Sol tarafta yer alan LOG bileşeni yüksekliği, genişliği, uzunluğu, alanı, hacmi ve konumu gibi fiziksel ve mekânsal özellikleri kapsayan bir nesne geometrisini temsil eder. Sağ tarafta yer alan LOIN bileşeni nesnenin adı, tipi, malzemesi, teknik özellikleri, planlama verileri, çevresel etkiler, teslimat ve bakım bilgileri gibi çok katmanlı verileri içermektedir [27].

1.3.5 Gelişim Düzeyi (LOD) ve Detay Seviyesi (LoD) Kavramlarının Farkı

LOD kavramını devam etmeden önce literatürde sık sık birbirinin yerine kullanılan bu iki kavramın anlamları arasındaki farkı netleştirmek önemlidir. Literatürde LoD (*Level of Detail*), Türkçe karşılığı detay seviyesi [23] olarak çevrilen kavramı sıklıkla LOD (*Level of Development*) kavramına karşılık olarak kullanılır [26]. Her iki sistem de model detaylandırmasını 100'den 500'e kadar derecelendirir ancak odaklandıkları konular farklıdır. LoD, bir modeldeki her bir bileşenin ne kadar detay içerdiğini gösterir ama bu detayların güvenilir olup olmadığını belirtmez [24].

Yani görsel olarak ileri düzeyde detaylandırılmış bir öge, projenin ilgili paydaşları tarafından henüz kesinleştirilmemiş olabilir. LOD kavramı ise bir model ögesinin içerdiği bilgilerin güvenilirlik düzeyini de tanımlar [24]. Yani modelde yer alan bilginin, karar vericiler tarafından ne ölçüde kullanılabilir olduğuna odaklanır. Bilgi sabitleşmiş ve tüm proje katılımcıları tarafından onaylanmışsa LOD düzeyi yükseltilir [27]. Örneğin bir giriş bileşeni eğimli yüzeyler ve tesisat geçişleriyle birlikte ayrıntılı şekilde modellenmiş olabilir. Fakat bu detaylar henüz mühendislik tarafında onaylanmadıysa LOD 100 düzeyinde kabul edilir. LOD kavramı, tasarım sürecinde farklı varyasyonların denenmesi ve karşılaştırılması için kullanışlıdır [25].

Bir kapı modeli çiziminde kolu, menteşesi, çerçevesi hatta üzerindeki cam desenleri bile yer alıyorsa bu kapı modeli yüksek LoD'ye (örneğin LoD 350) sahiptir, çünkü ayrıntı seviyesi yüksektir. Ancak bu kapının malzeme türü, ürün kodu, üretici bilgisi, yangına dayanıklılık sınıfı ya da teslimat tarihi gibi bilgiler henüz netleşmemiş ve modelde yer almıyorsa, bu öge LOD 100 ya da 200 seviyesindedir. Yani, model görsel olarak detaylı görünse de projenin karar vericileri bu kapı bilgisini güvenle kullanamaz. Çünkü bu detaylar henüz doğrulanmamıştır [25].

Kavram karmaşası olmaması adına CityGML modellerinde de kullanılan LoD kavramını da kısaca açıklamak gerekir. CityGML'de tasarım sürecinden ziyade görselleştirme, analiz ve arşivleme gibi amaçlar ön plandadır. 2005'ten bu yana LOD yerine LoD kavramı yaygın olarak kullanılmakta ve model bileşenlerinin geometrik karmaşıklık düzeylerini tanımlamak için tercih edilmektedir [24].

1.3.6 LOD Kullanımının Sağladığı Faydalar

LOD kavramına dair tüm bu açıklamaların ardından, sağladığı faydaların da ortaya konması, bu yapının neden bu kadar önemli olduğunu daha net gösterecektir. En başta, BIM projelerinde ortak bir anlayış zemini kurarak farklı disiplinlerin daha uyumlu çalışmasını mümkün kılar [1]. Her yapı bileşeni için belirlenen detay seviyesi ve bilgi güvenilirliği, iletişimdeki belirsizlikleri azaltır. Tasarım sürecinde oluşabilecek bilgi kargaşasını önler [25]. Böylece mimarlar, mühendisler, yükleniciler ve işverenler, modelden hangi çıktıları beklediklerini açıkça ifade edebilir, teslimat kapsamı netleşir. Kaynakların daha etkin kullanılmasına katkı sunar. Ne gereğinden

fazla detay içeren karmaşık modeller, ne de eksik bilgi nedeniyle tekrar işlenmesi gereken eksik modeller oluşur [24]. Bu da zaman ve bütçe kayıplarının önüne geçer [10]. Modelin gelişimi belirli LOD seviyelerine göre izlenebilir ve denetlenebilir hâle gelir. Böylece dijital ikiz gibi ileri düzey BIM uygulamalarında ihtiyaç duyulan veri olgunluğu da sağlanmış olur [24]. Kısacası LOD projelerin şeffaf, tutarlı ve sürdürülebilir şekilde yönetilmesini sağlayan temel bir yapıdır.

1.3.7 BIM Olgunluk Düzeyi

Olgunluk modelleri, genellikle kalite yönetimi ilkelerine dayanan ve pek çok sektörde uygulanmakta olan sistematik çerçevelerdir [32]. Kuruluşların ya da bireylerin süreçlerini belli kriterlere göre öz değerlendirme yöntemiyle analiz etmelerine olanak tanır [33]. İş süreci yönetimi [34], yazılım Ar-Ge [35], dijital devlet uygulamaları [36], bilgi yönetimi [37] ve proje yönetimi [38] gibi çeşitli alanlarda yetkinlik gelişimini teşvik etmeyi amaçlar [32].

Olgunluk modelleri aynı zamanda, kurumların gelişimini aşamalar hâlinde ele alan öngörülebilir bir ilerleme yapısına sahiptir [39]. Her yeni aşama, bir öncekine göre daha yüksek bir yetkinlik seviyesini temsil eder ve bu kademeli ilerleyiş, kurumlara stratejik bir yol haritası sunar [40]. BIM bağlamında olgunluk seviyeleri ilk kez İngiltere’de UK BIM Task Group tarafından geliştirilmiş ve hükümet politikalarıyla resmî hâle getirilmiştir. Sonrasında ise EU BIM Task Group ve ISO 19650 serisi aracılığıyla uluslararası ölçekte benimsenmiştir. Olgunluk seviyeleri Seviye 0’dan Seviye 3’e olacak şekilde detaylandırılır [41].

1.3.7.1 Seviye 0

Proje süreci tamamen geleneksel yöntemlerle yürütülür. Örneğin bir mimar çizimini AutoCAD ile hazırlar, çıktı alır ve bu çizimi fiziksel olarak mühendise verir. Mühendis de kendi yorumunu elle veya ayrı bir çizimle ekler. Tüm bilgi akışı belgeler üzerinden, manuel şekilde ilerler. Bilgiler dijital ortamda kayıt altına alınsa bile ortak bir platformda paylaşılmaz. Seviye 0, veri tekrarına ve iletişim eksikliklerine açık bir süreçtir (Tablo 1.8) [42].

Tablo 1.8 BIM Olgunluk Seviyesi 0 Özeti [42]

Bölüm	Açıklama
Tanım	Dijital iş birliğinin bulunmadığı ve proje bilgilerinin yalnızca 2B CAD çizimleri veya basılı dokümanlar üzerinden yönetildiği en alt düzeydir.
Teknik Bileşenler	Genellikle DWG/DXF formatlarında 2B çizimler ve PDF belgeleri kullanılır, herhangi bir ortak veri ortamı ve standart veri yapısı mevcut değildir.
İş Birliği Düzeyi	Paydaşlar kendi verilerini bağımsız olarak üretir, koordinasyon e-posta, telefon veya basılı çizimler üzerinden sağlanır, eş zamanlı dijital iş birliği yoktur.
Avantajlar ve Sınırlılıklar	Yeni teknoloji ihtiyacı olmadan uygulanabilir ancak iş birliği eksikliği, veri kopukluğu ve manuel kontrol gereksinimi nedeniyle verimsizlik riski yüksektir.

1.3.7.2 Seviye 1

Seviye 1’de dijitalleşme başlamıştır ancak süreç hâlâ parçalıdır. Örneğin mimar tasarımını 3B CAD ortamında yapar fakat mühendise yalnızca 2B PDF çizimi gönderir. Her disiplin kendi verisini üretir ve yönetir. Çizimler belirli bir dosya standardına göre isimlendirilip Ortak Veri Ortamı’na yüklenir. Fakat ekipler hâlâ ayrı çalışır. Çizimlerin son halini tüm paydaşlar göremeden onay sürecine girebilir. Yani bilgi dijital ortamda saklanır ama gerçek anlamda paylaşılmaz (Tablo 1.9) [42].

Tablo 1.9 BIM Olgunluk Seviyesi 1 Özeti [42]

Bölüm	Açıklama
Tanım	Dijitalleşmeye geçişin ilk adıımıdır. Çoğunlukla 2B CAD çizimleri olsa da kavramsal düzeyde 3B CAD kullanımı başlamıştır. Tasarımlar hâlen geleneksel yollarla yürütülse de, bilgi paylaşımı için temel bir dijital düzen oluşturulur.
Teknik Bileşenler	Proje belgeleri genellikle AutoCAD veya MicroStation gibi araçlarla hazırlanır. Veriler yüklenici tarafından yönetilen Ortak veri ortamı içinde paylaşılır. BS 1192:2007 gibi standartlar dosya adlandırma, katmanlama ve versiyon kontrolü için kullanılır. Açık veri formatları yaygın değildir.
İş Birliği Düzeyi	Disiplinler hâlâ kendi verilerini ayrı üretir ve yönetir. Ancak Ortak veri ortamı sayesinde bu bilgiler merkezi bir platformda depolanır. Ekipler arasında bilgi paylaşımı başlasa da bu paylaşım zamanlı ve sınırlıdır. Gerçek zamanlı ortak model oluşturulmaz. Disiplinler birbirinin verilerini referans alarak çalışır, ancak tam bir entegrasyon sağlanmaz.
Avantajlar ve Sınırlılıklar	Seviye 0’a göre daha düzenli ve kontrollü bir süreç sunar. Belge yönetimi kolaylaşır, standartlar sayesinde tutarlılık sağlanır. Ortak veri ortamı bilgiye erişimi hızlandırır. Ancak iş birliği hâlâ yetersizdir; disiplinlerarası uyumsuzluklar yaşanabilir. 4B/5B (maliyet/zaman boyutu) entegrasyonları mümkün değildir ve projeler proje boyunca entegre bir şekilde yönetilemez.

1.3.7.3 Seviye 2

Seviye 2’de, disiplinler kendi 3B modellerini üreterek IFC gibi açık formatlar ile paylaşır. Modeller belirli aralıklarla birleştirilerek federatif model oluşturulur. Örneğin mimar, yapının mimari modelini oluşturur, inşaat mühendisi bu modele taşıyıcı sistemini ekler. Çakışmalar dijital ortamda önceden tespit edilerek disiplinler arası birlikte çalışabilirlik artar. Herkesin kendi işini yaptığı ama aynı hedefe yöneldiği bir sistemdir (Tablo 1.10) [42].

Tablo 1.10 BIM Olgunluk Seviyesi 2 Özeti [42]

Bölüm	Açıklama
Tanım	Disiplinlerarası iş birliğinin başladığı ve dijital modelleme sürecinin belirli standartlara bağlandığı gelişmiş bir seviyedir. Her paydaş kendi 3B BIM modelini üretir, bu modeller düzenli aralıklarla bir araya getirilerek koordinasyon sağlanır. Verilerin açık formatlarla paylaşılması esas alınır. Bu yönüyle Seviye 1’den farklı olarak çok disiplinli dijital model birliği sağlanır.
Teknik Bileşenler	Disiplin modelleri farklı yazılımlarda hazırlanır (Revit, ArchiCAD, Tekla vb.) ancak açık formatlar (ör. IFC ve COBie) ile ortaklaşa kullanılır. BS 1192, PAS 1192 serisi ve BS 1192-4 gibi standartlar belge yönetimini ve veri alışverişini düzenler. Veriler ortak veri ortamı aracılığıyla yönetilir, model birleştirme ve çakışma analizleri için Navisworks, Solibri gibi araçlar kullanılır.
İş Birliği Düzeyi	Tüm paydaşlar kendi BIM modellerini üretilip paylaşır, bunlar federatif bir modelde birleştirilir. İş birliği senkronize veri paylaşımı yoluyla sağlanır. Disiplinler ayrı modeller üretse de ortak bir koordinasyon modeli oluşturularak çakışmaların tasarım aşamasında çözülmesi sağlanır. Bu, Seviye 1’e kıyasla çok daha yüksek düzeyde etkileşim ve bilgi uyumu sağlar.
Avantajlar ve Sınırlılıklar	Daha yüksek tasarım koordinasyonu, çakışmaların erken tespiti ve proje süresince daha az hata gibi önemli avantajlar sunar. Modelden doğrudan metraj alma, 4B ve 5B analizlerin yapılabilmesi maliyet ve zaman kontrolünü güçlendirir. Ancak paylaşımlar hâlâ dosya tabanlıdır. Tam eş zamanlı çalışma mümkün değildir. Gerçek zamanlı güncelleme ve tam model entegrasyonu için Seviye 3’e ihtiyaç vardır.

1.3.7.4 Seviye 3

Seviye 3’te tüm paydaşlar aynı dijital model üzerinde aynı anda çalışabilir. Örneğin elektrik mühendisi bir priz eklediğinde, bu değişiklik anında tüm modelde görünür ve mimar ya da statikçi bu değişikliği anlık olarak görebilir. Tüm kararlar ortak bir veri modeline dayanarak alınır. İşletme aşamasında BIM modeli kullanılarak bakım planlaması yapılabilir. Seviye 3’te tasarım, yapım ve işletme süreçleri dijitalleştirilmiştir (Tablo 1.11) [42].

Tablo 1.11 BIM Olgunluk Seviyesi 3 Özeti [42]

Bölüm	Açıklama
Tanım	Tüm proje paydaşlarının tek bir merkezi model üzerinde eş zamanlı olarak çalıştığı tam entegre ve iş birliğine dayalı BIM düzeyidir. Bilgiler bulut tabanlı sistemlerde toplanır, modelleme süreci tasarımdan işletmeye kadar tüm yaşam döngüsünü kapsar. Seviye 2'den farklı olarak veri paylaşımı artık dosya bazlı değil, canlı ve sürekli senkronize bir ortamda gerçekleşir.
Teknik Bileşenler	Model, ortak bir sunucuda tutulur. Tüm paydaşlar aynı dijital modele erişir. Açık standartlar (IFC, COBie vb.) tam anlamıyla entegre edilmiştir. Yazılımlar API ve web servisleriyle bağlantılı çalışır. Model güncellemeleri anlık yapılır. Ayrıca IoT, sensör sistemleri, Tesis yönetimi yazılımları gibi dış sistemlerle entegrasyon mümkündür. Bu da Seviye 2'den temel farklardan biridir.
İş Birliği Düzeyi	Tüm disiplinler aynı model üzerinde aynı anda çalışabilir. Her güncelleme tüm ekip tarafından anında görülür. Tasarım, inşaat, işletme gibi farklı süreçler arasında dijital kopukluk kalmaz. Karar alma süreci çok daha hızlıdır çünkü bilgi akışı kesintisiz ve şeffaftır. Bu da Seviye 2'ye göre daha güçlü, sürekli ve entegre bir iş birliği anlamına gelir.
Avantajlar ve Sınırlılıklar	Gerçek zamanlı veri paylaşımı, daha az hata, daha hızlı karar alma ve tüm yaşam döngüsü boyunca bilgi sürekliliği sağlar. Tasarım değişiklikleri anında izlenebilir, çakışmalar anlık çözülür, bina işletmesi doğrudan modelle entegre olur. Ancak yüksek altyapı maliyeti, standartlaşma ihtiyacı ve veri güvenliği riskleri gibi sınırlamalar nedeniyle yaygın kullanım henüz sınırlıdır.

1.3.8 BIM Boyutları

BIM, üç boyutlu geometrik modellemenin ötesine geçen, çok katmanlı bir bilgi yönetim sistemi olarak tanımlanabilir. Modelin farklı proje aşamalarındaki teknik entegrasyon seviyelerini tanımlamak üzere geliştirilen bu kavram, veri yapısına her aşamada yeni bir nitelik ekleyerek modelin işlevselliğini artırır. Örneğin 5B BIM, maliyet verilerini modele entegre ederek yapı bileşenlerinin birim fiyat, miktar ve malzeme cinsi gibi bilgilerle tanımlanmasını sağlar. Böylece otomatik metraj ve bütçe analizleri gerçekleştirilebilir [43].

BIM boyutları farklı kullanım senaryolarını belirli başlıklar altında toplayarak teknik uygulamalara netlik kazandırır. Zamanla gelişen sektör ihtiyaçlarına göre bu boyutlara yeni fonksiyonlar eklenebilmekte ve BIM, statik bir sistem olmaktan çıkarak sürekli gelişen bir bilgi platformuna dönüşmektedir [44]. nB (n boyutlu) BIM kavramı, hâlihazırda tanımlanmış boyutların yanı sıra gelecekte entegre edilebilecek tüm olası veri katmanlarını ifade eden kapsayıcı bir terim olarak kullanılmaktadır [1]. Tanımlı boyutlara ilişkin detaylı açıklamalar Tablo 1.12'de sunulmuştur.

Tablo 1.12 Farklı BIM Boyutlarının İncelenmesi

BIM Boyutu	Tanım	Proje Katkıları
3B Üç Boyutlu Modelle	BIM'in 3. boyutlu olan 3B, bir yapının üç boyutlu (x, y, z eksenlerinde) dijital geometrik modelini oluşturmayı ifade eder. Bu sayede proje baştan sona gerçeğe yakın görselleştirilmesi ve tüm tasarım verilerinin ortak bir veri ortamında toplanması mümkün olur.	Görselleştirme ve İşbirliği: 3B BIM, tasarımın tüm paydaşlar için anlaşılır kılarak ekiplerin daha verimli iletişim kurmasını sağlar. Disiplinler arası çakışma tespiti yapılabildiği için hatalar erken aşamada yakalanır ve yeniden iş yapma ihtiyacı azalır. Ortak model üzerinde çalışma, farklı takımların uyum içinde çalışmasına ve proje genelinde şeffaflığın artmasına katkı sunar.
4B Zaman	3B modele zaman bilgisinin eklenmesiyle inşaat sürecinin takvim ve süre boyutunu ifade eder. Bu boyutta, projenin hangi aşamada ne kadar sürede yapılacağı ve işlerin hangi sırada ilerleyeceği, model üzerinden zaman çizelgesiyle planlanır.	İnşaat Planlama: 4B BIM sayesinde süreç planlaması ve iş programı optimizasyonu iyileşir. Farklı disiplinler (mimar, mühendis, yüklenici vb.) arasında koordinasyonu kolaylaştırır. Zaman çizelgesinin modele entegre olması olası takvim uyumsuzluklarını önceden ortaya çıkarır. Gecikmeleri ve beklenmedik aksaklıkları engelleyerek projenin zamanında ve daha güvenli tamamlanmasına yardımcı olur.
5B Maliyet	Projeye maliyet verilerinin entegre edilmesiyle finansal boyutun modellenmesidir. Bu sayede daha proje başlangıcında detaylı bütçe analizi ve maliyet tahmini yapılabilir; proje boyunca oluşacak harcamalar ile olası değişiklikler model üzerinde öngörülebilir hale gelir.	Bütçe Kontrolü: 5B BIM, dijital modelden otomatik metraj ve maliyet hesapları çıkararak finansal planlamayı hızlandırır. Gerçek zamanlı maliyet güncellemeleri sayesinde tasarımdaki değişikliklerin bütçeye etkisi anında görülür. Dijital maliyet takibi ve raporlaması, projede bütçe aşımı riskini en aza indirir ve kaynakların verimli kullanılmasını sağlar.
6B Sürdürülebilirlik	Yapının sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği verilerini modele dahil ederek yaşam döngüsü performans analizini mümkün kılar. Tasarım aşamasından itibaren binanın enerji tüketimi tahmin edilir, karbon ayak izi ve malzeme seçimleri gibi çevresel etkiler değerlendirilebilir. Böylece daha sürdürülebilir ve maliyet-etkin kararlar desteklenir.	Enerji ve Yaşam Döngüsü Yönetimi: 6B BIM'le yapının uzun vadede enerji tüketimini azaltıcı önlemler tasarım aşamasında alınabilir ve her kararın işletme maliyetlerine etkisi önceden analiz edilir. Modelde bileşenlerin üretim, montaj tarihi, bakım planı gibi çok sayıda bilgi verileri tutulduğunda, bina kullanıma alındıktan sonra bakım-onarım süreçleri daha verimli yönetilir ve yapı ömrü boyunca performans optimize edilir.
7B İşletme ve Bakım	Yapının tesis yönetimi ve bakım verilerinin BIM modeline entegre edilmesidir. Bina bileşenlerinin bakım programları, garanti bilgileri, teknik dokümanları gibi tüm işletme döngüsü verileri merkezi modelde toplanır ve bina yaşam süresi boyunca kullanılmak üzere saklanır.	Tesis Yönetimi ve Bakım: 7B BIM, binanın tasarımından yıkımına dek olan süreçte varlık ve bakım yönetimini optimize eder. İlgili tüm bakım-onarım bilgilerine model üzerinden hızlı erişim, arızaların daha çabuk giderilmesini sağlar. Bu da işletme aşamasında hizmet kalitesini artırır ve tesis yönetiminde süreklilik ve verimlilik oluşturur.
8B İş Sağlığı Ve Güvenliği	Tasarım ve inşaat süreçlerinde iş sağlığı ve güvenliği verilerinin BIM modeline eklenmesini ifade eder. Modelde ekipman, iskele, yapım tehlikeleri gibi güvenlik unsurları önceden planlanarak potansiyel risklerin öngörülmesini sağlar. Bu boyut, sahada meydana gelebilecek kazaları önlemeye katkı sunar.	Güvenlik Planlaması: 8B BIM ile inşaat başlamadan önce sanal ortamda şantiye koşulları simüle edilerek tehlikeler önceden tespit edilebilir. Bu sayede iş güvenliği planları daha detaylı şekilde hazırlanır, saha uygulamalarında daha emniyetli hale gelir. Proje ekibi, model üzerinden güvenlik risklerini görüp gerekli önlemleri daha hızlı şekilde alabilir.

1.4 BIM Platformları

BIM teknolojisi, üç boyutlu modelleri mimari, yapısal, mekanik, elektrik ve tesisat disiplinlerinin aynı dijital ortamda birlikte veri üretip paylaşmasına olanak tanır. Güncel BIM yazılımları ise bu temel yapının ötesine geçerek zaman planlaması (4B), maliyet tahmini (5B), enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik (6B) ile işletme yönetimi (7B) gibi ileri düzey işlevleri de destekler [5].

Tablo 1.13, BIM teknolojisinde yaygın kullanılan başlıca platformları ve bu platformların öne çıkan teknik özelliklerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır.

Tablo 1.13 BIM Platformlarının Özellikleri [1]

Platform	Özellikler	Avantajlar	Dezavantajlar
Autodesk Revit	Revit, mimari tasarım, yapı mühendisliği ve MEP (Mekanik, Elektrik, Sıhhi Tesisat) disiplinleri için kullanılan kapsamlı bir BIM yazılımıdır. Model tabanlı bir yaklaşımla 3D tasarım, veri yönetimi ve analiz yapmayı sağlar.	Kapsamlı modelleme araçları, güçlü veri yönetimi, geniş kullanıcı kitlesi, Autodesk ekosistemiyle entegrasyon	Yüksek öğrenme eğrisi, güçlü donanım gereksinimi, yüksek lisans maliyeti
Graphisoft Archicad	Archicad, özellikle mimarlar için geliştirilmiş bir BIM yazılımıdır. Katman tabanlı modelleme sunar ve parametrik bileşenler ile tasarım yapmayı kolaylaştırır.	Kullanıcı dostu arayüz, gelişmiş görselleştirme, güçlü işbirliği araçları	Büyük projelerde performans sorunları, bazı mühendislik disiplinleri için sınırlı destek
Bentley OpenBuildings Designer	Bentley Systems'in geliştirdiği bu yazılım, bina tasarımı ve mühendislik süreçleri için kapsamlı BIM çözümleri sunar. Özellikle altyapı projelerinde güçlüdür.	Güçlü mühendislik araçları, geniş altyapı entegrasyonu, büyük ölçekli projelerde iyi performans	Karmaşık arayüz, yüksek maliyet
Trimble Tekla Structures	Tekla, özellikle çelik ve betonarme yapı tasarımlarında uzmanlaşmış bir BIM platformudur. Hassas modelleme ve detaylandırma özellikleri ile öne çıkar.	Hassas detaylandırma, güçlü mühendislik analizleri, üretime yönelik BIM desteği	Yüksek öğrenme eğrisi, bazı disiplinlerde sınırlı destek
Nemetschek Allplan	Allplan, mimarlar ve mühendisler için geliştirilmiş güçlü bir BIM çözümüdür. Modüler yapısı sayesinde çeşitli mühendislik disiplinleriyle entegre çalışabilir.	Esnek modelleme araçları, modüler yapı, yüksek veri uyumluluğu	Kullanıcı arayüzü alışılması zaman alabilir, sınırlı pazar payı
Autodesk BIM 360	Autodesk'in bulut tabanlı BIM yönetim platformudur. Proje yönetimi, iş birliği ve veri paylaşımı konusunda çözümler sunar.	Bulut tabanlı erişim, merkezi veri yönetimi, güçlü entegrasyonlar	İnternet bağlantısına bağımlılık, yüksek maliyet
Dassault Systèmes CATIA	CATIA, özellikle endüstriyel tasarım ve mühendislik süreçleri için kullanılan güçlü bir 3D modelleme platformudur. Gelişmiş yüzey modelleme araçlarına sahiptir.	Çok disiplinli tasarım desteği, yüksek hassasiyet, güçlü analiz araçları	Yüksek maliyet, öğrenme süreci uzun
BricsCAD BIM	BricsCAD BIM, DWG tabanlı BIM modelleme sunan bir yazılımdır. Alternatif ve uygun maliyetli bir BIM çözümü olarak öne çıkar.	DWG tabanlı çalışma, düşük maliyet, AutoCAD ile yüksek uyumluluk	Sınırlı eklenti desteği, büyük projelerde performans sorunları
Vectorworks Architect	Mimarlık ve iç mekan tasarımı için geliştirilmiş bir BIM yazılımıdır. Özellikle tasarım özgürlüğü sunan araçları ile bilinir.	Kullanıcı dostu arayüz, esnek modelleme, güçlü görselleştirme	Büyük projelerde performans sorunları, sınırlı mühendislik desteği

1.5 BIM Kapsamındaki ISO Standartları

ISO 19650 serisi, BIM uygulamalarının ortak bir çerçevede yürütülmesini amaçlayarak bina yaşam döngüsü boyunca bilgi yönetimine dair kurallar getirir [45]. İlk bölümlerinde bilgi yönetimini sistematik hale getirirken farklı kullanıcı gruplarının ihtiyaçlarını da sürece dâhil eder [46]. Teslimat ve işletim aşamalarındaki bilgi akışı bu standartlarla daha netleşir. İşverenlere yönelik rehberlik eksikliği ve bütçe, mevzuat, kültürel farklılıklar ile uzman yetersizliği gibi engeller karmaşık projelerde uygulamayı zorlaştırmaktadır [47]. ISO standartları benimsendiğinde, eksikliklerin giderilmesini sağlayarak uluslararası çerçeve ile yerel uygulamalar arasında köprü kuracaktır. ISO 19650 dışındaki BIM ve CBS-BIM standartları da bu kapsamda sınıflandırılmış olup bir kısmı yürürlükte, bir kısmı taslak aşamasındadır (Tablo 1.14, Tablo 1.15 ve Tablo 1.16).

Tablo 1.14 ISO 19650 Standartlarının Gösterimi [31]

Standart	Odak Alanı	Tanım
ISO 19650-1:2018	BIM ile Bilgi Yönetimi Kavramları ve İlkeleri	BIM kapsamında bilgi yönetimi için kavramsal çerçeve ve süreç organizasyonunu tanımlar. Tüm yaşam döngüsü boyunca bilgi yönetimini destekler.
ISO 19650-2:2018	Varlıkların Teslimat Aşamasında Bilgi Yönetimi	Varlık teslimat sürecinde, bilgi alışverişi ve yönetimi için süreç ve gereklilikleri düzenler. Tüm varlık tipleri ve organizasyonlara uygulanabilir.
ISO 19650-3:2020	Varlıkların Operasyonel Aşamasında Bilgi Yönetimi	Varlıkların operasyonel aşamasında bilgilerin yönetilmesine odaklanır. Verilerin, varlığın ömrü boyunca doğru ve kullanışlı kalmasını sağlar.
ISO 19650-4:2022	Bilgi Değişim Süreçleri ve Kalite Yönetimi	BIM süreçlerinde bilgi değişimini, karar verme kriterlerini ve bilgi modeli kalitesini güvence altına alacak mekanizmaları ayrıntılandırır.
ISO 19650-5:2020	BIM Süreçlerinde Güvenlik Odaklı Bilgi Yönetimi	ISO 19650 serisi kapsamında, proje, varlık veya hizmetle ilgili oluşturulan, işlenen ve saklanan hassas bilgilerin güvenli yönetimini kapsar.
ISO 19650-6:2025	Sağlık ve Güvenlik Bilgileri Yönetimi	Sağlık ve güvenlik hususlarını bilgi yönetim süreçlerine entegre ederek daha güvenli operasyonları teşvik eder.

Tablo 1.15 BIM ile İlgili Diğer ISO Standartları [48]

Standart	Odak Alanı	Tanım
ISO 15686-4:2014	Hizmet Ömrü Bilgi Yönetimi	BIM ve tesis yönetimi yazılımlarında hizmet ömrü bilgisi alışverişi için veri yapısını ve standartları açıklar.
ISO 23386:2020	BIM Özellik Tanımlama ve Veri Sözlüğü Yönetimi	Yapı endüstrisinde BIM süreçleri için özelliklerin tanımlanması ve veri sözlükleri üzerinden standartlaştırılması amacıyla metodoloji kurallarını ve yönetim süreçlerini belirler.
ISO 22057:2022	BIM’de EPD Verilerinin Kullanımı	Çevresel ürün beyanlarının (EPD) BIM ortamında kullanılabilirliğini sağlamak için veri şablonu temelli yapı sunar.
ISO 12911:2023	BIM Uygulama Çerçevesi	BIM uygulaması için kuruluşların geliştirme ve yönetim süreçlerinde kullanacağı şartname oluşturma çerçevesi sunar. Tüm yapı ve altyapı türlerine uygulanır.
ISO/TS 7127:2023	BIM’de Aydınlatma Sistemleri Özellikleri	Dijital bina tasarımı ve bakımında aydınlatma sistemleri için BIM özelliklerini tanımlar, veri eşleşmesini ve kaliteyi artırır.
ISO 7817-1:2024	BIM Bilgi İhtiyacı Seviyesi ile Kavramlar ve İlkeler	BIM süreçlerinde bilgi ihtiyacı seviyelerini ve teslimat detaylarını tanımlamak için kavram ve metodolojiler sunar. Yapı varlıklarının tüm yaşam döngüsündeki bilgi yönetimini destekler.
ISO 16739-1:2024	IFC Veri Şeması (BIM için Açık Standart)	Bina ve altyapıların tüm yaşam döngüsü boyunca disiplinler arası bilgi alışverişini sağlamak amacıyla geliştirilen ve yapı bileşenlerinden süreçlere kadar veri teslimatlarını destekleyen, BIM için açık ve uluslararası bir IFC veri şemasıdır.
ISO 23387:2025	BIM için Yapı Nesnesi Veri Şablonları	BIM süreçlerinde kullanılacak yapı nesneleri için makine tarafından okunabilir veri şablonlarının ilkelerini ve yapısını tanımlar. Veri alışverişinde standartlaşmayı destekler.
ISO/AWI TS 7817-2 (Gelişme Aşamasında)	BIM Bilgi İhtiyacı Seviyesi ve Uygulama Rehberi	Bilgi ihtiyacı seviyesinin projelerde nasıl uygulanacağını açıklar. Geometrik ve alfanümerik bilgi gereksinimlerini tanımlar ve ilgili standartlarla (ISO 19650, IFC vb.) bağlantı kurar.
ISO/AWI 7817-3 (Gelişme Aşamasında)	BIM LOD Şeması	BIM veri şablonları ve değişim standartlarına uygun olarak, LOD için UML veri modeli ve XML şeması geliştirir.
ISO/AWI TS 25676 (Gelişme Aşamasında)	BIM’de Geometri ile Teknik Özelliklerin Bağlantısı	BIM nesnelerinin geometrik modelleriyle teknik özelliklerinin ilişkilendirilme yöntemlerini açıklar ve karşılaştırır.

Tablo 1.16 CBS ve BIM ile İlgili ISO Standartları [49]

Standart	Odak Alanı	Tanım
ISO/TS 19166:2021	BIM'den CBS'ye Kavramsal Haritalama (B2GM)	BIM verilerini CBS ortamına aktarmak için kullanıcı ihtiyacına dayalı olarak üç temel eşleme mekanizmasını (perspektif tanımlama, nesne eşleme, LOD eşleme) tanımlar; fiziksel şema birleşimi içermeksizin kavramsal düzeyde yönlendirme sunar.
ISO/TR 23262:2021	CBS ve BIM Birlikte Çalışabilirliği Veri Entegrasyonu	CBS ve BIM alanları arasındaki kavramsal ve teknik uyumsuzlukları inceleyerek, veri, servis ve süreç seviyelerinde karşılaşılan engellerin aşılması için çözüm önerileri ve gelecekteki standartlaştırma başlıklarını ortaya koyar.
ISO/AWI 23143-1 (Gelişme Aşamasında)	BIM ile CBS Arasında Veri Paylaşımı İçin Temel İlke ve Tanımlamalar	CBS ile BIM arasında bilgi alışverişinin nasıl yapılması gerektiğine dair temel ilkeleri ortaya koyar. Mevcut uluslararası standartların birlikte kullanımına rehberlik ederken, özellikle BIM modellerinin coğrafi referanslama gerekliliklerini vurgular.
ISO/AWI 23143-2 (Gelişme Aşamasında)	Meta Veriler Aracılığıyla Veri Alışverişinin Kolaylaştırılması	BIM ve CBS arasında iki yönlü bilgi alışverişini mümkün kılmak için meta verilerin nasıl tanımlanması gerektiğini örnek senaryolar üzerinden açıklayarak, teknik gereklilikleri ve kavramsal uyumu ele alır.
ISO/AWI 23143-3 (Gelişme Aşamasında)	BIM ve CBS Arasındaki Soyut Kavramların Eşleştirilmesi	BIM ve CBS sistemleri arasındaki birlikte çalışabilirliği sağlamak amacıyla her iki alandaki soyut kavramları, üst modelleri ve uygulama şemaları düzeyinde bağlamaya yönelik yöntemsel bir çerçeve sunar.
ISO/AWI TS 23143-4 (Gelişme Aşamasında)	Geometrik Gösterimin Uyumlanması	CBS ve BIM sistemlerinde kullanılan farklı geometrik temsilleri birbirine uyarlamak için ISO standartlarına dayalı bir filtreleme ve eşleme yaklaşımı geliştirir. Özellikle eğimli arazi veya doğrusal referans sistemleri gibi bağlamlarda karşılaşılan uyumsuzlukları ele alır.
ISO/DTS 19166 (Gelişme Aşamasında)	BIM'den CBS'ye Kavramsal Haritalama (B2GM)	Kavramsal eşleme gereksinimlerinin daha net tanımı, eşleme bileşenlerinin detaylandırılması ve dışa aktarımının daha sistematik ve teknik olarak açıklanacağı planlanmaktadır. Not: ISO/TS 19166:2021 Standartının yerini alacaktır.

BÖLÜM 2

TUCBS 3B BİNA TEMASININ INSPIRE YENİLİKLERİYLE BİRLİKTE DEĞERLENDİRİLMESİ

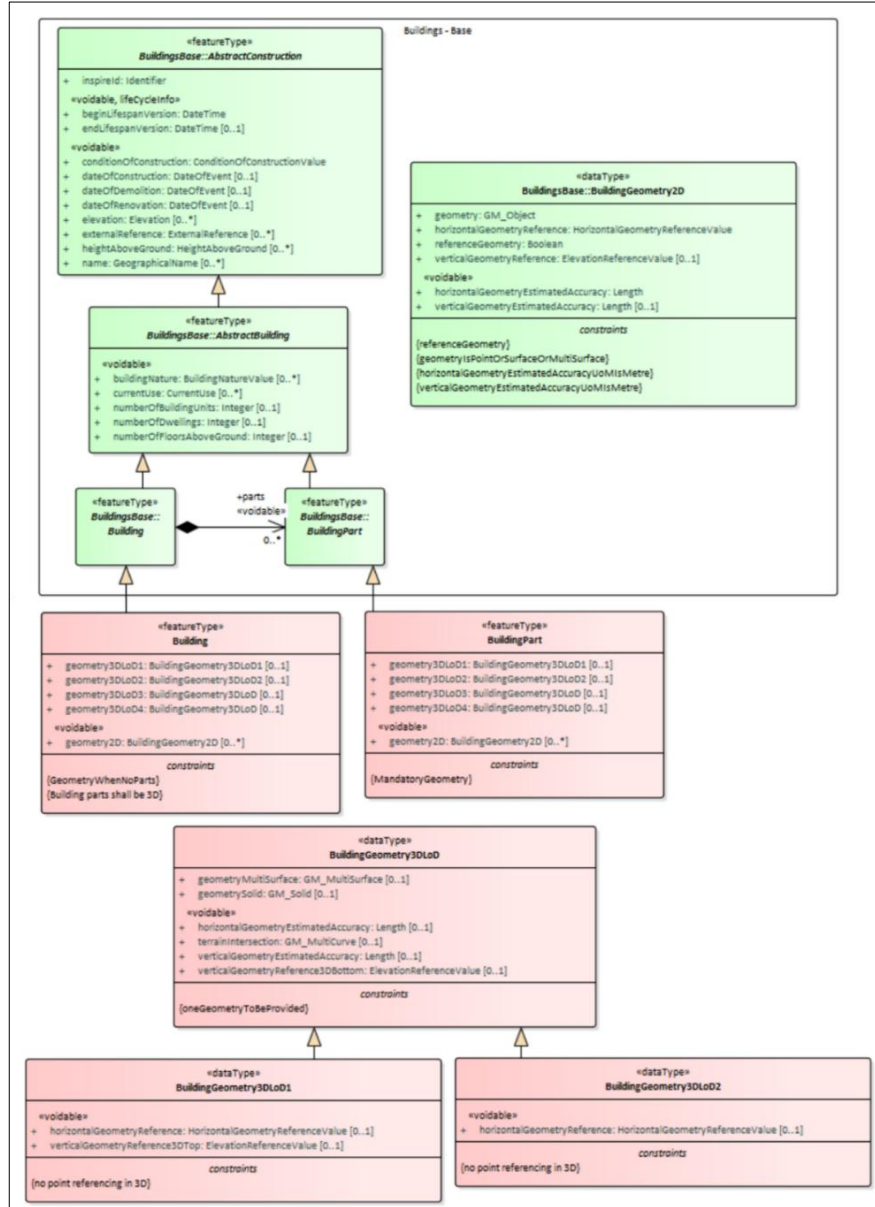
İkinci bölümde, Avrupa Birliği'nin INSPIRE girişimi kapsamında 31 Ocak 2024 tarihinde yayımlanan INSPIRE Bina Veri Spesifikasyonu Teknik Kılavuzu, TUCBS 3B Bina teması çerçevesinde ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. İnceleme sırasında modelin çok katmanlı LoD sistematğine dayanan veri yapısı, semantik bileşenleri ve geometrik temsil yöntemleri ortaya çıkarılmıştır. LoD0'dan LoD4'e kadar tanımlanan her detay seviyesinin içerdği öznitelikler, UML sınıfları, veri türleri ve mekânsal ilişkiler tek tek ele alınmıştır. CityGML 2.0 ile 3.0 sürümleri arasındaki LoD gösterimine dair kavramsal ve yapısal farklar da incelenmiştir.

TUCBS 3B Bina Teması'na ait UML şemalarının CityGML ile ilişkisi ortaya konmuştur. YapıModeli-Bina3B uygulama şeması incelenerek IFC veri modelindeki BIM nesnelerinin CityGML 3.0 standardına uygun şekilde 3B Bina Teması'na aktarılması için kullanılan eşleştirmeler değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerin ardından 3B Bina Teması'nın IFC tabanlı BIM verileriyle uyumunu güçlendirmeye yönelik bir dizi öneri geliştirilmiştir. Bunlar arasında senaryo ve analiz odaklı LOD eşleme yöntemlerinin tasarlanması, geometrik ve semantik dönüşüm kurallarının belirlenmesi, web tabanlı BIM verisi yayımı için teknik altyapının oluşturulması, GUID tabanlı kimlik eşlemesi kullanılması, TUCBS'ye özgü model görünüm tanımlarının hazırlanması ve BIM ve CBS entegrasyonu için kapsamlı bir rehberin oluşturulması yer almaktadır. Devamında açık kaynaklı dönüşüm şemalarının geliştirilmesi, farklı paydaşlara yönelik teknik doküman ile eğitim içeriklerinin hazırlanması ve ulusal ölçekte standartların geliştirilmesine hizmet edecek stratejik adımlar önerilmiştir.

2.1. INSPIRE 3B Bina Modeli Üzerindeki Yenilik ve Geliştirmeler

Yenilenmiş INSPIRE bina modeli, 2B ve 3B veri temsilleri için Çekirdek (Core) ve Genişletilmiş (Extended) olmak üzere iki profile sahiptir.

Şekil 2.1 INSPIRE 3B Çekirdek (Core) Bina Modelinin Gösterimi



Çekirdek profil, binaların en temel tanımlayıcı verilerini içeren yapıdır. İnşaat, yenileme bilgisi, yıkım tarihi gibi zaman verilerinin yanı sıra yükseklik ve kat sayısı gibi fiziksel özellikler bulunur (Şekil 2.1). Modeldeki bilgilerin açık ve tutarlı biçimde yönetilmesini sağlar [50].

Genişletilmiş 3B profil (*Extended 3D*), Bina3B (*Building3D*) profilini temel almıştır. Malzeme türü, yasal değer, tesisat bağlantıları, kullanım alanları, odalar ve birimler gibi ayrıntıların yanı sıra kapı, pencere, oda ve sınır yüzeyleri gibi iç mekân bileşenlerini de kapsamaktadır [50].

INSPIRE bina modeli, CityGML'den farklı olarak ek sınıf ve öznitelikler içerir. Örneğin Bina Birim (*BuildingUnit*) sınıfı ile konut sayısı ve inşaat durumu gibi bilgiler eklenmiş, bu sayede çevresel politika süreçlerine veri desteği sağlanmıştır. Geometri ve metaveri alanları ayrı tutulmuş geometriler özniteliklerle, doğruluk ve kaynak bilgileri ise özel metaveri tipleriyle tanımlanmıştır. CityGML'de bina parçaları iç içe tanımlanabilirken, INSPIRE yalnızca ana bina ile ona doğrudan bağlı parçalar arasında ilişki kurar. Yani modeli sadeleştirerek veri yönetimini kolaylaştırır. Ayrıca CityGML bina yüzeylerine termal haritalar veya gürültü dağılımı gibi çevresel veriler ekleyebilirken, INSPIRE yalnızca temel kaplama bilgisiyle yetinmiştir [50].

2.1.1 Zenginleştirilmiş Geometri Temsili

INSPIRE bina modelindeki geometri temsilleri, bina bileşenlerini dış yüzey ve iç mekân olarak ayırarak her birini kendi özelliklerine uygun biçimde tanımlar. 3B mekânsal nesnelerin geometrisi aşağıdaki beş tipten biri kullanılarak oluşturulmaktadır:

- ***BuildingGeometry3D***: Çekirdek profile tanımlanmıştır. Bina ve bina parçasına ait nesnelerin geometrik temsili sunar. Genellikle hacimsel veya çok yüzeyli (*multisurface*) geometriler üzerinden bina dış yüzeyini ifade eder. CityGML'in *lod1Solid*, *lod2Solid* gibi öğelerine karşılık gelir.
- ***GM_Solid* / *GM_MultiSolid***: Bu veri tipleri yalnızca LoD4 seviyesinde kullanılır. *GM_Solid*, tekli odaların kapalı hacimlerini temsil ederken, *GM_MultiSolid*, birden fazla katıdan oluşan yapı birimlerini (örneğin bir daire grubunu) ifade eder. İç mekân modellemesinde gerçekçi hacim tanımı sağlar.
- ***BoundaryGeometry3D***: 3B Sınır Geometrisi, bina yüzeylerine ait çatı, duvar ve döşeme gibi sınır bileşenlerini tanımlar. Hem yatay hem dikey doğruluk gereksinimleri taşıyan bu tip, sınırların geometrik bütünlüğünü ve konumsal

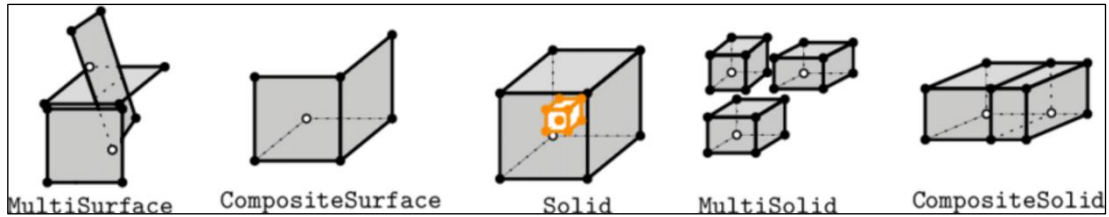
hassasiyetini sağlamak amacıyla kullanılır. LoD2 ve LoD3 seviyelerinde önemlidir (Şekil 2.2).

Şekil 2.2 3B Sınır Geometrisine Ait Şema [50]

«dataType» BoundaryGeometry3D	
+ LoD2MultiSurface: GM_MultiSurface [0..1]	
+ LoD3MultiSurface: GM_MultiSurface [0..1]	
+ LoD4MultiSurface: GM_MultiSurface [0..1]	
«voidable»	
+ horizontalGeometryEstimatedAccuracyLoD2: Length [0..1]	
+ horizontalGeometryEstimatedAccuracyLoD3: Length [0..1]	
+ horizontalGeometryEstimatedAccuracyLoD4: Length [0..1]	
+ verticalGeometryEstimatedAccuracyLoD2: Length [0..1]	
+ verticalGeometryEstimatedAccuracyLoD3: Length [0..1]	
+ verticalGeometryEstimatedAccuracyLoD4: Length [0..1]	
constraints	
{atLeastOneMandatoryGeometry}	

- **GM_Object:** Genel amaçlı geometrik ilkelerdir. Anten gibi çizgisel, güneş paneli gibi yüzeysel veya çatı penceresi (dormer) gibi hacimsel bileşenlerin temsili için kullanılır. Özellikle tesisat (*installation*) ve diğer yapılar (*other construction*) gibi genişletilmiş model içeriklerinde kullanımı yaygındır.

Şekil 2.3 CityGML'de Kullanılan 3B Temel Geometrik Öğelerin Gösterimi [51]

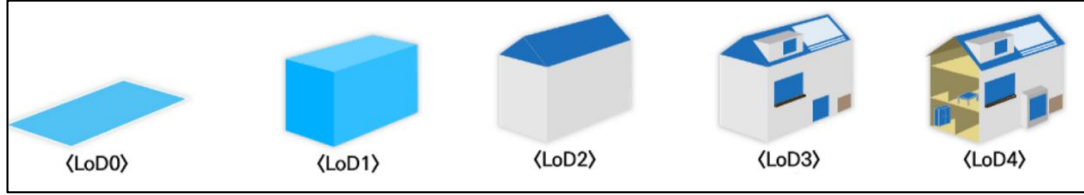


Bina ve bina bloğu (*Building/BuildingPart*) nesneleri, 3B katı (*solid*) ya da çok yüzeysel (*multisurface*) geometrilerle birlikte temel semantik bilgilerle modellenir [50]. En yaygın temsiller arasında cephe ve çatı yüzeyleri için *MultiSurface*, hacimsel gösterimler için *MultiSolid* ve farklı hacimleri birleşik biçimde ifade eden *CompositeSolid* bulunur (Şekil 2.3) [51].

2.1.2 CityGML 2.0 ve 3.0 Versiyonları İçin LoD Gösterimi Farkı

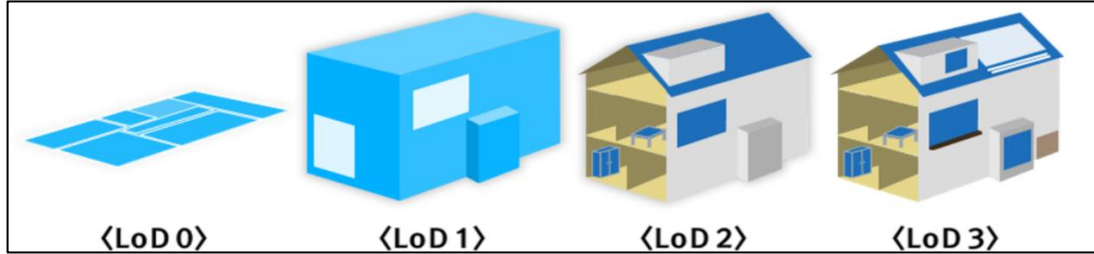
INSPIRE'daki LoD seviyelerini detaylıca anlatmaya geçmeden önce, INSPIRE'daki mevcut tanımların CityGML 2.0 versiyonuna dayandığını belirtmek gerekir.

Şekil 2.4 CityGML 2.0'da LoD Seviyelerinin Gösterimi [52]



CityGML 2.0 versiyonunda, LoD0'dan LoD4'e kadar beş düzey bulunmaktadır. İç mekân bileşenleri ve bina mobilyaları yalnızca LoD4 düzeyinde temsil edilebilmektedir (Şekil 2.4). LoD1 sabit yüksekliğe sahip 3B blok temsili sunarken, kapı/pencere gibi açıklıklar ve oda detayları daha yüksek seviyelere bırakılmıştır [52].

Şekil 2.5 CityGML 3.0'da LoD Seviyelerinin Gösterimi [52]

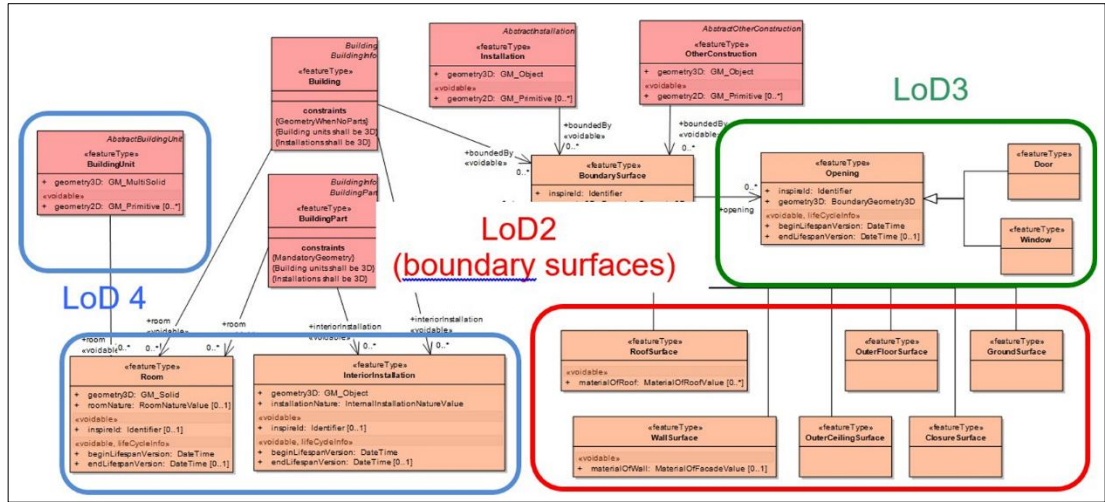


CityGML 3.0 ile birlikte LoD kavramı daha esnek ve çok temsilli hâle getirilmiş, her LoD seviyesinde oda, açıklık, iç/dış yüzey gibi bileşenlerin modellenebilmesi mümkün olmuştur. LoD0 yalnızca yüzeysel temsillerle sınırlı kalmayıp çok katmanlı 2B planlar da içerebilmektedir. LoD1, yapının genel kütlesini ve temel çıkıntılarını gösterir. LoD2 ve LoD3 düzeyleri ise çatı çıkıntıları, cephe detayları ve yüzey dokularına kadar daha zengin bir geometrik içerik sunar (Şekil 2.5) [52].

2.2. INSPIRE LoD UML Şemaları ve Semantik Kapsamı

INSPIRE 3B Bina Modeli, CityGML'in LoD1–LoD4 seviyelerini temel alarak binaların dış yüzey, hacim, katman ve konumsal bilgilerini gelişmiş semantik özniteliklerle tanımlar [50]. Şekil 2.6'da bina bileşenlerinin LoD2, LoD3 ve LoD4 seviyelerine göre geometrik ve semantik ilişkileri UML diyagramı üzerinden gösterilmektedir.

Şekil 2.6 LoD2, LoD3 ve LoD4'ün UML Şematik Gösterimi [50]



2.2.1 Level of Detail 0 (LoD0) UML Şeması

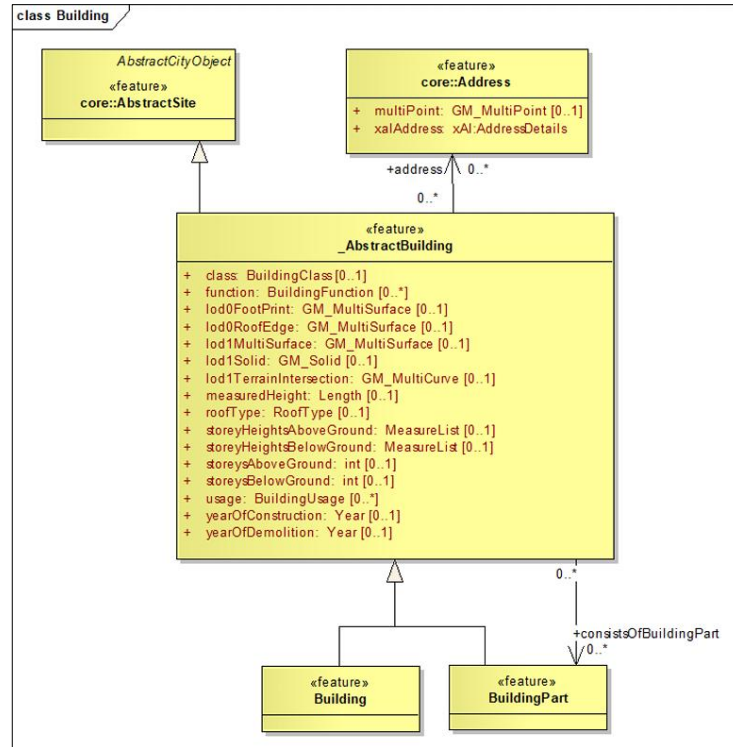
LoD0 seviyesinde binalar, yatay 3B (*her x,y konumuna tek yükseklik atanmış 2.5B temsil*) yüzeyler olarak temsil edilmekte olup bu yüzeyler genellikle bina ayak izi (*lod0FootPrint*) ya da çatı kenarı (*lod0RoofEdge*) ifade eder (Şekil 2.7) [53]. Geometrik temsil, hacimsel ya da ayrıntılı cephe verileri olmadan yalnızca yatay izdüşüm bilgisiyle sınırlıdır. Ayrıca işlev (*function*), kullanım amacı (*usage*), zemin üstü kat yükseklikleri (*storeyHeightsAboveGround*), inşa yılı (*yearOfConstruction*) ve yıkım yılı (*yearOfDemolition*) gibi tematik bilgiler de modele eklenmiştir. Böylece 2B geometriyle sınırlı olsa da bina kullanımı, yüksekliği ve inşa yılı gibi bağlamsal verilerle zenginleştirilmiş temel analizler gerçekleştirilebilir. Binalar, kent ölçeğinde genel yapı yoğunluğu, bina dağılımı veya arazi kullanımı gibi makro analizler için sembolik olarak gösterilir.

Modelin merkezinde yer alan *AbstractBuilding* sınıfı, *Building* ve *BuildingPart* kavramlarını kapsayarak ortak bir üst yapı oluşturmuştur. Böylece geometrik ve semantik öznitelikler tek bir çatı altında toplanarak bütüncül bir yapı elde edilmiştir [50].

LoD1 düzeyine ait *lod1Solid*, *lod1MultiSurface* ve *lod1MultiCurve* gibi geometri tanımları ile yapının farklı biçimlerde sunulmasını sağlar. Ek olarak *measuredHeight*, *storeysAboveGround*, *storeysBelowGround*, *yearOfConstruction* ve *yearOfDemolition* gibi nitelikler aracılığıyla binanın yüksekliği, kat sayısı ve kullanım ömrü gibi temel bilgiler modele eklenebilir [50].

Address sınıfı aracılığıyla yapının gerçek dünyadaki adres bilgileri modele entegre edilmiştir. Ayrıca sınıf (*class*), işlev (*function*) ve kullanım durumu (*usage*) gibi semantik nitelikler ile yapının kullanım amacı hakkında bilgi sunmaktadır. Model görsel bir temsil olmakla beraber karar destek süreçlerinde kullanılabilecek anlamlı bir veri kaynağı hâline gelir. LoD1 seviyesine ait UML diyagramı Şekil 2.9'da sunulmuştur [50].

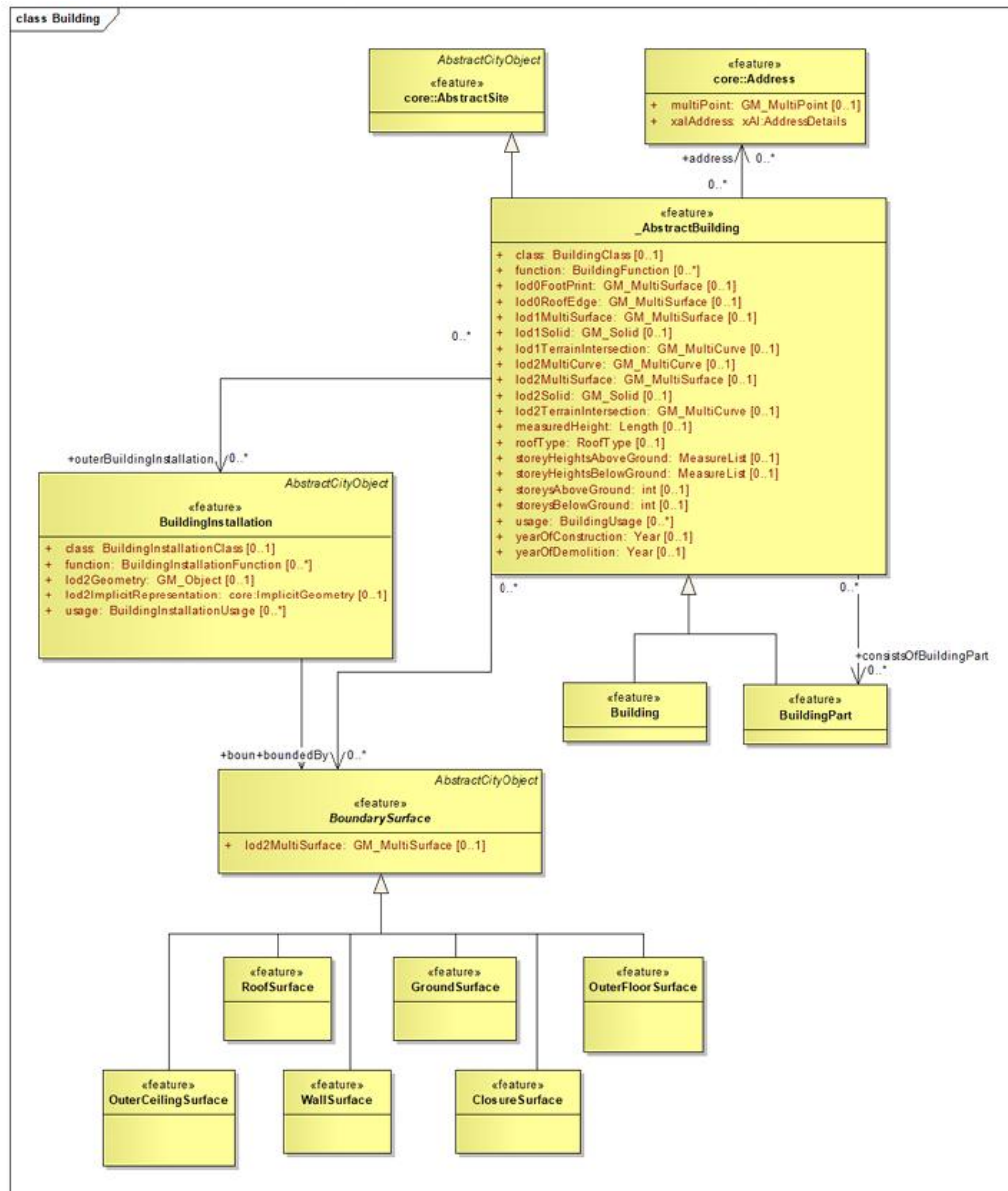
Şekil 2.9 Bina Modelinin LoD1 UML Diyagramı [50]



2.2.3 Level of Detail 2 (LoD2) UML Şeması

LoD2 seviyesinde, bina modelleri geometrik ve semantik düzeyde daha fazla ayrıntı içerir. Çatılar basit hacimlerle değil de yapıya özgü genel çatı formunu yansıtacak şekilde modellenir. Çatı çıkmaları gibi detaylar isteğe bağlı olarak dâhil edilebilir. Duvarlar, tıpkı LoD1’de olduğu gibi dikey yüzeyler olarak modellenir. Ancak, çatı ve duvar gibi yapılar sadece geometrik yüzeyler olarak değil RoofSurface, WallSurface gibi tematik sınıflar altında ayrı ayrı tanımlanır [50].

Şekil 2.10 Bina Modelinin LoD2 UML Diyagramı [50]



LoD2 düzeyinde bina sınır yüzeyleri *BoundarySurface* öznitelikleri aracılığıyla semantik olarak ayrıştırılır. Örneğin bir bina modelinde çatı (*RoofSurface*), duvar (*WallSurface*), zemin (*GroundSurface*), kapatma yüzeyi (*ClosureSurface*), dış tavan (*OuterCeilingSurface*) ve dış zemin (*OuterFloorSurface*) ayrı sınıflar şeklinde gösterilir. İlgili UML diyagramı Şekil 2.10'da sunulmuştur [50].

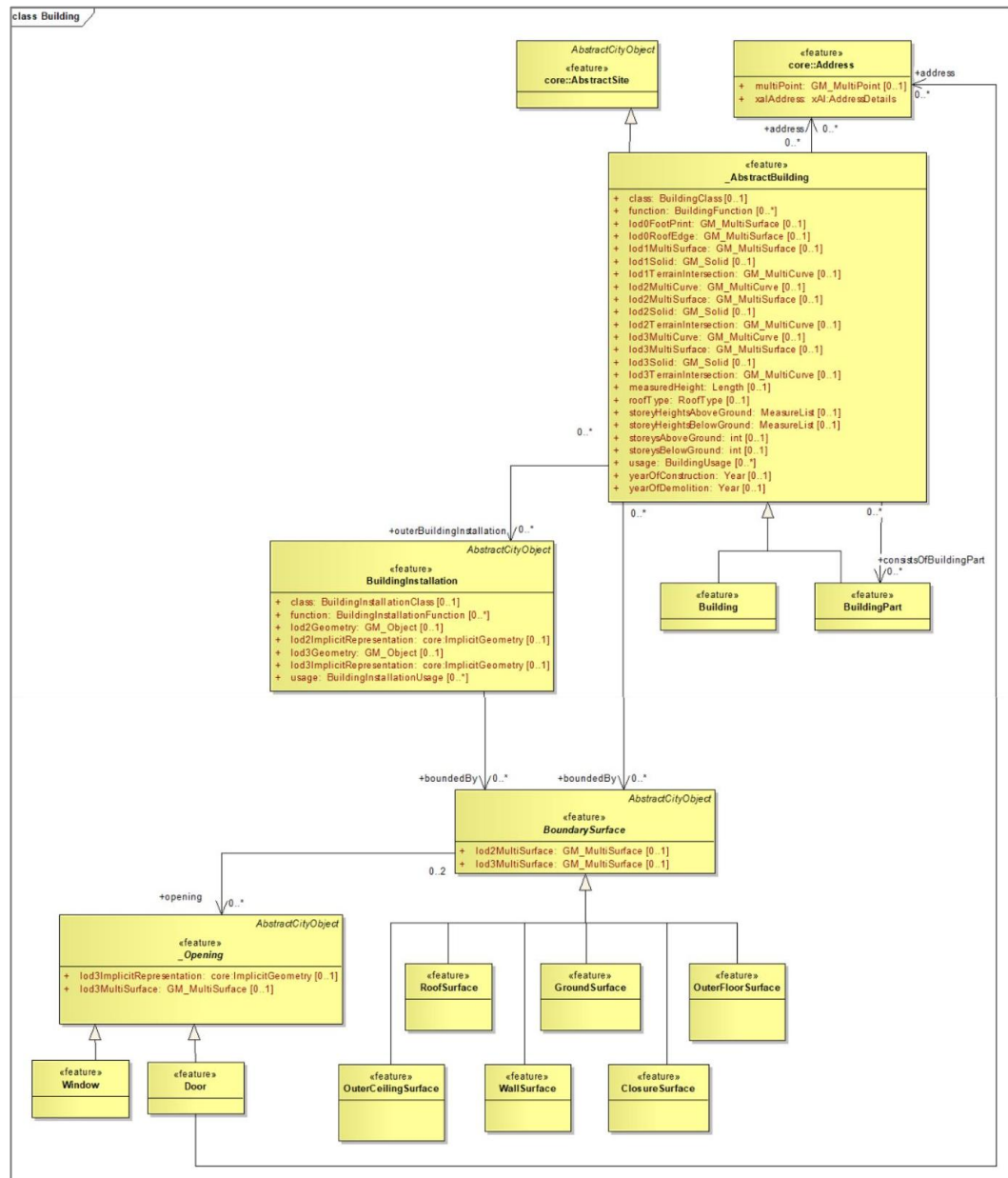
2.2.4 Level of Detail 3 (LoD3) UML Şeması

LoD3 seviyesi, binanın dış görünümünü oldukça ayrıntılı bir şekilde temsil eder. Mimari yapıların cephe ve çatı detaylarının (örn. balkonlar, çıkmalar, çatı pencereleri, bacalar ve benzeri dış eklentiler) geometrik ve semantik olarak modellenmesini sağlar. Yüksek çözünürlüklü dokular (*textures*) bina yüzeylerine eşlenebilir. Böylece sanal şehir modellemeleri, mimari görselleştirme ve kentsel analiz gibi uygulamalarda için görsel bütünlük ve gerçekçilik oluşur [50].

Şekil 2.11'de gösterildiği gibi INSPIRE veri modelinde bu düzey, *AbstractBuilding* sınıfı altında tanımlanan bina nesnesinin *lod3Solid*, *lod3MultiSurface* gibi geometri temsilleri ile modellenmesini içerir. Aynı zamanda çatı tipi (*roofType*), ölçülen yükseklik (*measuredHeight*), zemin üstü kat sayısı (*storeysAboveGround*) ve zemin altı kat sayısı (*storeysBelowGround*) gibi yapısal özniteliklerle genişletilmiştir. Binalar, semantik olarak sınır yüzeyi (*BoundarySurface*) üst sınıfı aracılığıyla çatı yüzeyi (*RoofSurface*), duvar yüzeyi (*WallSurface*), zemin yüzeyi (*GroundSurface*), kapatma yüzeyi (*ClosureSurface*), dış tavan yüzeyi (*OuterCeilingSurface*) ve dış zemin yüzeyi (*OuterFloorSurface*) gibi yüzey tiplerine ayrıştırılır. Bu yüzeyler *boundedBy* ilişkisi ile bina gövdesine bağlanmakta ve her biri *lod3MultiSurface* özelliğiyle geometrik olarak temsil edilmektedir [50].

LoD3'ün en önemli katkılarından biri, *BoundarySurface* sınıflarına açıklık (*Opening*) kavramının entegre edilmesidir. Kapı ve pencere gibi bileşenler, doğrudan bu yüzeylere bağlı *Window* ve *Door* sınıflarıyla semantik olarak ayrıştırılarak modellenir. Her açıklık nesnesi, kendine ait *lod3MultiSurface* veya *lod3Solid* geometrisiyle ilgili duvar ya da çatı yüzeyine bağlanır. Böylece açıklığın model içindeki konumu ve hangi yüzeye ait olduğu mekânsal olarak net biçimde tanımlanır [50].

Şekil 2.11 Bina Modelinin LoD3 UML Diyagramı [50]



Modelin önemli bir diğer bileşeni olan *BuildingInstallation* sınıfı, bina üzerine sabitlenmiş dış eklentileri (örn. baca, güneş paneli veya cephe çıkıntısı gibi) tanımlamakta ve bu nesneleri kendi *lod3Geometry* temsilleri ile detaylandırmaktadır. *BuildingPart* sınıfı aracılığıyla bloklardan oluşan kompleks yapılar her biri bağımsız bir birim olarak modellenabilir. Kurulan bu yapı sayesinde bina alt bileşenleri üzerinde detaylı analizler ve sorgular gerçekleştirilebilir [50].

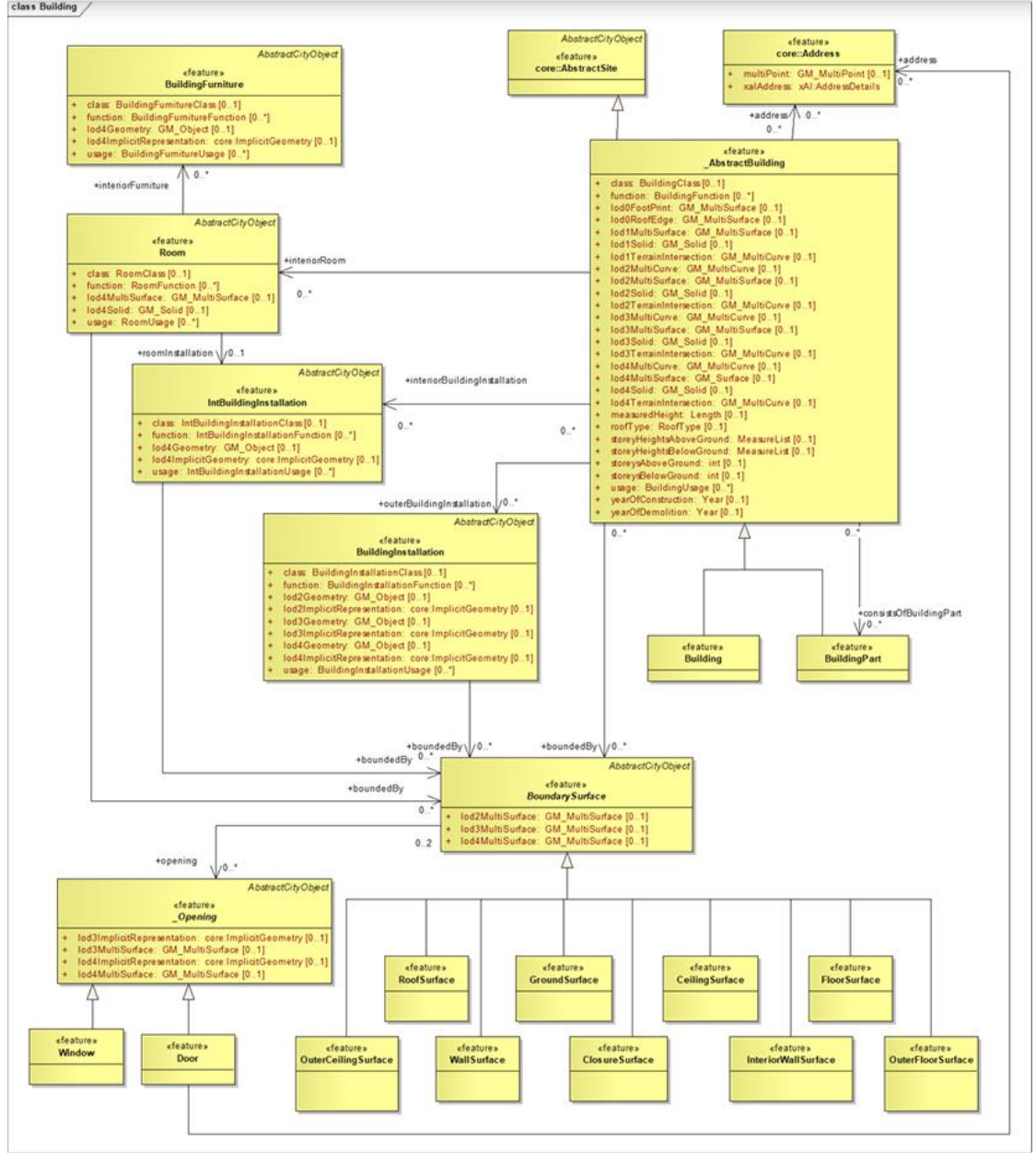
BIM modeli için IFC formatında yer alan detaylı cephe, açıklık ve yapı eklentisi bilgileri, bu seviyedeki semantik ayrımlar sayesinde CBS ortamına entegre edilerek yüksek doğrulukta 3B temsillerin oluşturulmasına katkı sağlar. Yani disiplinler arası veri entegrasyonunu ve teknik analizlerin doğruluğunu önemli ölçüde artırır [50].

2.2.5 Level of Detail 4 (LoD4) UML Şeması

LoD4 seviyesi, bir yapının dış geometrisini LoD3'te olduğu gibi ayrıntılı bir biçimde korurken, bunun üzerine iç mekân bileşenlerini de ekleyerek semantik açıdan en gelişmiş modelleme düzeyini sunar. Binanın içine odalar, iç duvar ve tavan yüzeyleri, kapı ve pencereler gibi açıklıklar, sabit tesisatlar ile mobilya gibi detaylı unsurlar entegre edilir [50].

UML diyagramlarında açıkça gösterildiği üzere, nesneler soyut sınıflar altında mantıklı bir hiyerarşiye oturtulmuştur. Örneğin tüm yüzey tipleri *BoundarySurface* adlı genel bir yapı altında toplanır. Açıklıklar ise ilgili yüzeylerle *opening* ilişkisi üzerinden bağ kurar. İç mekân öğeleri olan odalar (*Room*), mobilyalar (*BuildingFurniture*) ve sabit ekipmanlar (*BuildingInstallation*) gibi nesnelerin birbirleriyle kurduğu mekânsal ilişkiler UML diyagramda doğrudan isimlendirilmiş biçimde yer almaz. Bununla birlikte, şemada yer alan *boundedBy* ve *opening* gibi yapılar sayesinde bu bileşenler arasında iç içe yerleşim mantığı kurulabilir. *Room* nesnesi, iç duvar, tavan ve zemin gibi yüzeyleri ifade eden *BoundarySurface* türevleriyle *boundedBy* ilişkisi üzerinden bağlanır. Mobilya (*BuildingFurniture*) öğeleri ise, konumlandıkları mekânsal bağlamı ifade etmek için genellikle oda nesneleriyle ilişkilendirilir. Mobilyanın konumu genellikle *Room* geometrisinin sınırları içinde yer alacak şekilde modellenir. Böylece mobilyanın hangi odaya ait olduğu, geometrik kapsama yoluyla belirlenmiş olur. Açıklıkların iç mi dış mı yüzeyde yer aldığını belirten *interior* ve *outer* gibi etiketler yalnızca yönsel konum hakkında bilgi verebilir [50].

Şekil 2.12 Bina Modelinin LoD4 UML Diyagramı [50]



LoD4 yapısı, bina içinde semantik bütünlüğü ve topolojik doğruluğu sağlayarak, özellikle yangın tahliye senaryoları, iç mekân yönlendirme sistemleri, enerji verimliliği analizleri ve erişilebilirlik değerlendirmeleri gibi gelişmiş uygulamalar için altyapı sunar. CityGML'in en yüksek detay seviyesi olan LoD4, IFC formatındaki BIM verilerinin CBS ortamlarına taşınmasında belirleyici bir rol üstlenir. BIM modellerinde yer alan oda, mobilya ya da donatı gibi bileşenler, bu detay seviyesinde şehir modeline entegre edilerek teknik analizler ve yönetsel kararlarda

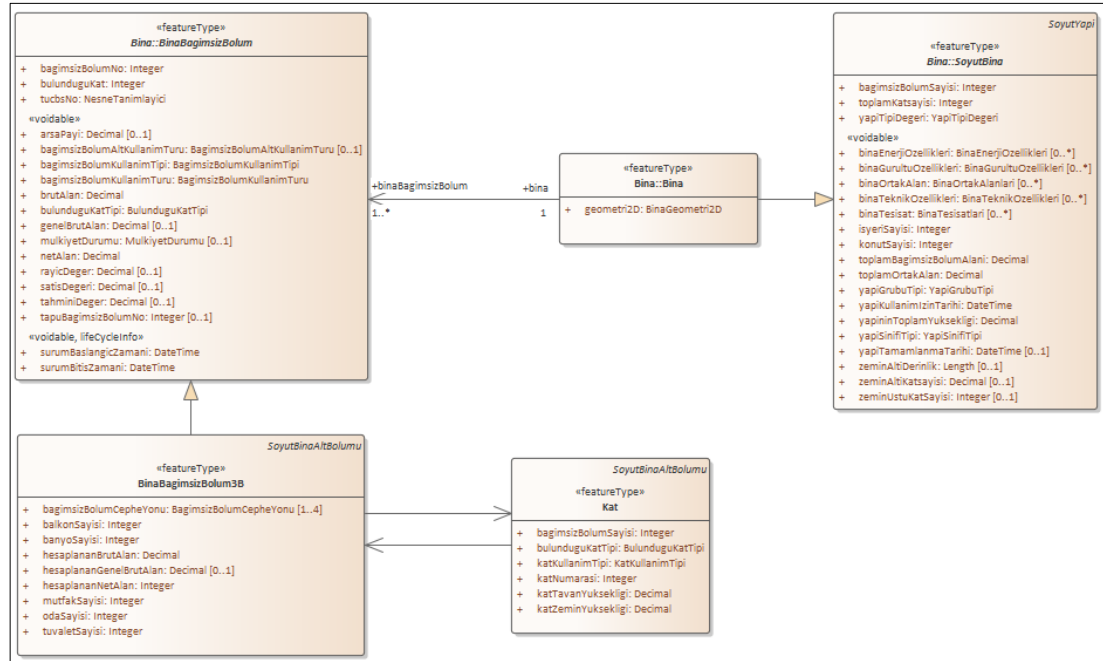
kullanılabilecek anlamlı bir veri katmanı haline gelir [50]. LoD4 seviyesine ait UML diyagramı Şekil 2.12’de gösterilmiştir.

2.3. INSPIRE Yeniliklerinin TUCBS 3B Bina Teması Özelinde Değerlendirilmesi

07 Kasım 2019 tarihli 49 Sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi ile tanımlanan 32 coğrafi veri temasından biri olan Bina Teması, ulusal coğrafi bilgi altyapısının sürdürülebilirliği için kritik öneme sahiptir [54]. Afet riski, enerji verimliliği, mülkiyet yönetimi, dijital ikiz, proje takibi ve akıllı şehir uygulamaları gibi pek çok alanda temel mekânsal veri kaynağıdır. 24 Ağustos 2022’de bu temanın ana veri sorumluluğu CBSGM’ye verilmiştir [55]. Bina Teması, uluslararası standartlarla (CityGML, OGC, ISO/TC 211, INSPIRE) uyumlu yapısı sayesinde birlikte işler bir veri modeli sunar ve farklı kurumların ürettiği verilerin ortak bir zeminde paylaşılmasına olanak tanır.

TUCBS 3B Bina Teması bina, kat, oda, kapı, pencere, cephe yüzeyleri ve mobilyalar gibi bileşenleri kapsamaktadır. Açıklık ve cephe ilişkileri soyut sınıflar üzerinden tanımlanmıştır. Brüt/net alan, yükseklik ve hacim gibi öznitelikler de şemaya eklenerek yapının işlevselliği geliştirilmiştir. Odalar, bağımsız kullanım birimleri ve katlar *BagimsizBolumKisimOda*, *BinaBagimsizBolum3B*, *Kat*, *OdaKullanimTipi* gibi sınıflarla ayrı tematik nesneler olarak modellenmiştir (Şekil 2.13). Bina bileşenleri ise *BinaMobilyası*, *BinaEklentisi* (*BuildingInstallation*) ve *BinaYapiElementi* gibi sınıflar aracılığıyla detaylı olarak ayrıştırılmaktadır. Kat sayısı, banyo-mutfak adedi, kapı-pencere özellikleri ve mobilya fonksiyonları gibi öznitelikler, LOD4 düzeyindeki semantik derinliği doğrudan desteklemektedir. İç mekân tanımları Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü’nün 3B kadastro projeleriyle uyumlu biçimde modellenmiştir [56].

Şekil 2.14 TUCBS 3B Bina UML Şeması [56]



CityGML 3.0’da olduğu gibi TUCBS 3B Bina Teması’nda da nokta, çizgi, yüzey ve hacimlerin yanı sıra çoklu geometri kümeleri (*MultiPoint*, *MultiCurve*, *MultiSurface*, *MultiSolid*) ile kompozit yapılar (*CompositeCurve*, *CompositeSurface*, *CompositeSolid*) kullanılmaktadır [56]. Hacimsel temsiller için B-Rep tercih edilmekte ve bu geometriler kavramsal düzeyde *GM_Solid*, *GM_Surface* ve *GM_CompositeSurface* gibi soyut sınıflarla tanımlanmaktadır. Nesne kimlikleri (*gml:id*, *class*, *name*) aracılığıyla veri bütünlüğü sağlanmaktadır (Şekil 2.14) [56].

TUCBS 3B Bina Teması CityGML 3.0’ı temel almakla birlikte, LOD’un çok katmanlı yapısının uygulamada net biçimde yansıtılması önemlidir. Öncelikle CityGML 2.0’dan 3.0’a geçişin mantığı ve çoklu temsile dayalı LOD yaklaşımı doğru kavranmalıdır. Ardından 3.0 ve gelecekte yayınlanacak CityGML sürümleriyle uyumlu, semantik ve geometrik açıdan zengin UML şemalarının geliştirilmesine devam edilmelidir.

3B Bina şemasının altına, Bina ve Bina Bloğu için veri tipi “BinaGeometri3BLoD1” şeklinde LoD4’e kadar geometri tanımlamaları ve UML şemaları eklenmelidir. Bu tanımlamalar, mevcut çekirdek şemada yer alan soyut geometrik sınıfların ötesine geçerek, her LOD düzeyine ait geometri türlerinin

(örneğin MultiSurface, Solid, MultiCurve) ayrı ayrı belirtilmesini sağlamalıdır. İlgili LoD tanımlamaları: “

- **BinaGeometri3BLoD**: Bir binanın veya bina parçasının 3B geometrisini ve bu geometriye bağlı meta veri bilgilerini gruplandıran veri türüdür.
- **BinaGeometri3BLoD1**: Üç boyutlu geometrik temsil; dış sınırın, düşey yan yüzeyler ve yatay taban çokgenleri ile genelleştirilmiş temsiline dayanır.
- **BinaGeometri3BLoD2**: Üç boyutlu geometrik temsil; dış sınırın, düşey yan yüzeyler ve tanımlı bir çatı şekilleri listesinden seçilen tipik bir çatı formu veya örtüsü ile genelleştirilmiş temsiline dayanır.
- **BinaGeometri3BLoD3**: Üç boyutlu geometrik temsil; dış sınırın ayrıntılı temsili (çıkıntılar, cephe elemanları ve pencere girintileri dâhil) ile çatı formunun (çatı pencereleri, bacalar dâhil) detaylı temsiline dayanır.
- **BinaGeometri3BLoD4**: Üç boyutlu geometrik temsil; dış sınırın ayrıntılı temsili (çıkıntılar, cephe elemanları ve pencere girintileri dahil) ile çatı formunun (çatı pencereleri, bacalar dahil) detaylı temsiline dayanır.”

INSPIRE’da olduğu gibi bu şekilde tanımlanabilir [50]. İlgili UML diyagramları bir önceki başlık (INSPIRE LOD UML Şemaları ve Semantik Kapsam) altında anlatılmış ve açıklanmıştır.

Geometri veri tiplerinin belirginleşmesi için, her 3B geometri için aşağıdaki tanımlamalarında eklenmesi önemlidir. Bu tanımlar: “

- ***geometryMultiSurface* (Çoklu Yüzey Geometrisi)**: Yapının dış sınırının, katı (*solid*) modele kıyasla topolojik olarak tam olmayan bir *MultiSurface* (çoklu yüzey) ile temsil edilmesidir. Bu temsilde zemin yüzeyi eksik olabilir.
- ***geometrySolid* (Katı Geometri)**: Yapının dış sınırlarının hacimsel ve topolojik olarak kapalı bir katı (*solid*) geometri ile temsil edilmesidir.
- ***horizontalGeometryEstimatedAccuracy* (Yatay Geometri Tahmini Doğruluğu)**: X ve Y koordinatlarının mutlak konumsal doğruluğunu ifade eden, ölçülen değer ile gerçek konum arasındaki ortalama farkı temsil eden

değer. TUCBS’ deki “yatayGeometriTahminiDogruluk” özniteliği kullanılabilir.

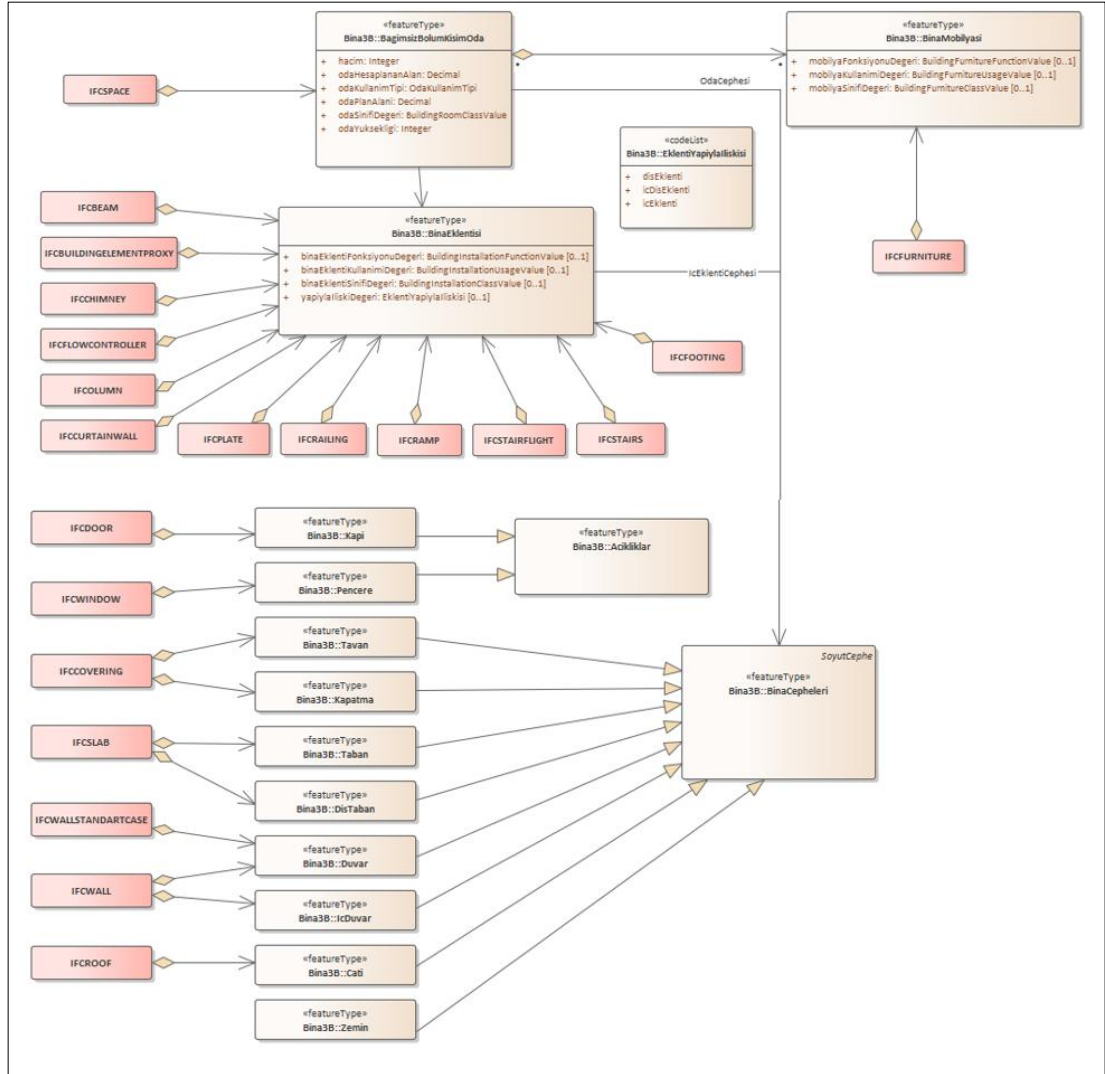
- ***terrainIntersection* (Arazi Kesişim Çizgisi)**, Bir yapının arazi temsili ile temas ettiği çizgi ya da çoklu çizgi (örneğin, bina ile zemin arasındaki kesişim çizgisi).
- ***verticalGeometryEstimatedAccuracy* (Düşey Geometri Tahmini Doğruluğu)**, Z (yükseklik) koordinatının mutlak konumsal doğruluğunu temsil eden, ölçülen değer ile gerçek yükseklik arasındaki ortalama fark.TUCBS’ deki “duseyGeometriTahminiDogruluk” özniteliği kullanılabilir.
- ***verticalGeometryReference3DBottom* (3B Düşey Referans Alt Noktası)**, Modelin alt yüksekliğinin (en düşük Z değeri) hangi referans seviyeye göre belirlendiğini ifade eden yükseklik düzeyi (örn. genel zemin kotu, inşaat tabanı). TUCBS’deki “yukseklkReferansDegeri” öznit eliği kullanılabilir.” [50].

TUCBS 3B Bina Teması’nda ‘*terrainIntersection*’ kullanımı, bina geometrilerinin gerçek arazi kotlarıyla uyumlu konumlandırılmasını sağlar. Sayısal yükseklik modelleriyle bütünleştirilmesi, eğim, yükseklik farklılıkları ve yapı tabanı gibi topografik unsurların doğru biçimde temsil edilmesine imkân verir. Taşkın analizi, altyapı planlaması ve kent tasarımı gibi uygulamalarda mekânsal doğruluk ve tematik bütünlük güçlenir.

2.4. 3B Bina Verilerinin IFC ile Eşlenmesi

TUCBS tarafından geliştirilen YapıModeli–Bina3B uygulama şeması, IFC nesnelerinin CityGML 3.0 ile ilişkilendirilerek ulusal 3B bina veri modeline dönüştürülmesini sağlayan kapsamlı bir ara modeldir. Amaç, BIM ortamında üretilen geometrik ve semantik içeriklerin CBS platformlarında yeniden kullanılabilir ve paylaşılabilir hâle getirilmesidir [56]. IFC, CityGML’e kıyasla çok daha ayrıntılı veri barındırdığı için eşleştirmelerde her iki modelin semantik yapısının dikkatle analiz edilmesi gerekmektedir [57]. Şekil 2.15’de IFC sınıfları ile TUCBS Bina Veri Teması arasındaki kavramsal eşleştirmeler gösterilmiştir

Şekil 2.15 IFC Nesneleri ile Yapı Modeli Bina 3B Uygulama Şemasının Eşleştirilmesi [56]



Eşleştirmelerde geometrik ve semantik uyum gözetilmiştir. Örneğin *IfcSpace* nesnesi BIM ortamında bir hacimsel mekânı tanımlarken, Bina3B şemasındaki *BagimsizBolumKisimOda* sınıfı aynı mekânın geometrisini ve kullanım amacını (örn. yatak odası, mutfak) birlikte ifade etmektedir. Benzer olarak *IfcBeam* veya *IfcChimney* gibi elemanlar, CityGML 3.0'ın *Construction* modülüyle uyumlu olacak şekilde *BinaEklemesi* adı altında gruplanmıştır. Şema genelinde toplam 21 IFC sınıfı, doğrudan TUCBS karşılıklarıyla eşleştirilmiş ve bu sayede veri kaybı olmaksızın semantik uyumluluk sağlanmıştır [56]. Ancak IFC'de tanımlı yaklaşık 653 nesne sınıfı bulunduğundan, kapsamlı bir entegrasyon için bu sınıfların da incelenmesi ve

TUCBS'ye karşılığı olmayanların ya kapsam dışı bırakılması ya da ilerideki şema genişletmelerinde değerlendirilmesi gerekmektedir.

TUCBS'nin 3B Bina Teması, IFC ve CityGML şemalarıyla yüksek düzeyde örtüşür. Örneğin, BinaProjesi sınıfı, IFC'deki *IfcProject* kavramını karşılar ve farklı proje türleriyle ilişkilendirilebilir. *IfcSite*, proje kapsamında binaların oturduğu arsa ve çevresel bağlamı temsil eder. TUCBS tarafında ise bu kavram Kadastro Teması'ndaki parsel yapısıyla ilişkilendirilmektedir. *IfcBuilding* nesnesi, TUCBS tarafında SoyutBina sınıfına denk gelir. Katlar, *IfcBuildingStorey*, odalar ve bağımsız bölümler ise *IfcSpace* ile eşleştirilebilir. Yapı elemanları bakımından duvar, çatı, döşeme ve tavan gibi yüzeyler sırasıyla *IfcWall*, *IfcRoof*, *IfcSlab* ve *IfcCovering* üzerinden temsil bulur. Kapı ve pencere bileşenleri ise *IfcDoor* ve *IfcWindow* sınıflarıyla örtüşmektedir.

TUCBS sadece mimari ve taşıyıcı sistemleri değil, TesisatTipi sınıfı aracılığıyla elektrikten yangın hattına kadar pek çok iç tesisat türünü de barındırır. Bu durum IFC'de yer alan bina içi tesisat verilerinin TUCBS ortamına aktarımını mümkün kılar. TUCBS'deki "Bina – Enerji, Gürültü, Teknik, Tesisat" gibi alt başlıklar, IFC'de yer alan disipline özgü bileşenlerin (örneğin HVAC, elektrik, mekanik sistemler) kavramsal olarak karşılık bulabileceği alanlar oluşturmaktadır.

IFC modelleri yerel koordinat sisteminde oluşturulurken, TUCBS EPSG kodlarına dayalı ulusal koordinat sistemini kullanır. Bu farkın giderilmesi için format dönüşümü, semantik sadeleştirme ve konumsal referanslama işlemlerinin yapılması gerekmektedir.

TUCBS'ye uyumlu bir aktarım süreci için IFC'de tanımlı tüm nesnelerin detaylı biçimde analiz edilmesi gerekmektedir. Karşılığı bulunmayan nesneler, ya ulusal veri standardında ihtiyaç dışı olarak ele alınmalı ya da TUCBS şemasının ileride genişletilmesine yönelik aday nitelikler olarak değerlendirilmelidir. Ayrıca TUCBS'de mevcut olup IFC'de yer almayan kavramların da CBS kimlikleri aracılığıyla BIM verisine entegre edilmesi önemlidir.

2.5. TUCBS–BIM Entegrasyonu için Teknik ve Stratejik Öneriler

ISO 19650 serisi ve IFC veri şemasıyla uyumlu ulusal BIM standartlarının oluşturulması veri sözlükleri, teslimat şablonları ve LoD rehberlerinin hazırlanmasıyla desteklenmelidir. Oluşturulacak teknik belgeler IFC verilerinin TUCBS ortamına entegre edilmesini sağlayacak açık veri dönüşüm şemalarının oluşturulmasına temel sağlayacaktır. Afet riski yönetimi ve kentsel dönüşüm gibi uygulama alanlarında, bu standartlara uygun olarak geliştirilecek pilot projeler aracılığıyla sistem performansı, veri doğruluğu ve birlikte çalışabilirlik düzeyleri ölçülebilir hale getirilecektir.

CityGML ve LandInfra gibi uluslararası standartlarla daha ayrıntılı bir kavramsal-şematik eşleştirme yapılması, ISO/TS 19166’da tanımlanan ilkeler doğrultusunda Bina temasının veri yapısının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Bununla birlikte IFC (4 ve üzerindeki sürümler) formatında veri teslimi ve TUCBS uyumluluğunun kamu ihale şartnamelerinde zorunlu kılınması, uygulamadaki sürekliliği ve kurumsal bağlılığı artıracaktır. Bu adımı destekleyecek şekilde kamu kurumları, belediyeler ve özel sektör temsilcilerine yönelik kapsamlı eğitim programları düzenlenmeli, sektördeki teknik kapasite güçlendirilmelidir. Böylece CBSGM, CBS–BIM dönüşümünün ulusal ölçekte koordinasyonunu ve standart belirlemesini üstlenen yetkili kurum olarak konumlanacaktır.

Süreç boyunca CBSGM’nin, belediyeler ve diğer kamu kurumları arasında veri paylaşımını kolaylaştıracak ortak platformların kurulmasında merkezi bir rol üstlenmesi, dijital inşaat süreçlerinin kurumsallaşması açısından stratejik önemdedir. Nihayetinde, BIM politikalarının yapı tasarımıyla sınırlı kalmayıp mekânsal veri altyapısı ile birlikte ele alınması sürdürülebilir, standartlara uyumlu ve birlikte çalışabilir dijital kent yönetimi sistemlerinin inşasına zemin oluşturacaktır.

2.5.1 IFC–TUCBS LOD Eşleme Kılavuzu Oluşturulması

CBS sistemleri ile BIM verilerinin uyumlu bir biçimde çalışabilmesi için her iki sisteminde detay seviyelerinin (LOD/LoD) doğru olarak eşlenmesi kritik bir adımdır. 3B Bina Teması’nda da IFC–CityGML eşleşmeleri yapılırken hangi IFC nesnesinin CityGML’de hangi detay seviyesine denk geldiğinin açık bir biçimde

tanımlanması ile dönüşüm sırasındaki veri yani bilgi kaybını en aza indirilecektir. Temel düzeydeki eşleştirmeler, IFC'deki her bir nesnenin LoD tarafında hangi özniteliklere sahip olduğunu gösterecek bir şekilde yapılabilir. Bunun yanı sıra analiz ya da senaryo odaklı bir yaklaşım da geliştirilebilir. Sistemler arasında net ve karşılaştırmalı bir LOD eşleme kılavuzunun oluşturulması dönüşümler için standardizasyon sağlayacaktır. Oluşturulacak kılavuz ile dönüşüm sürecinde yorum farklarının en aza indirilmesi, semantik ve geometrik veri kaybının önlenmesini sağlanacaktır. İlgili yaklaşımlar aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

2.5.1.1 Temel Veri Dönüşüm Odaklı Eşleme

İlk yaklaşım daha çok bir standardizasyon odaklıdır. Nesnelerin LoD düzeyinde sahip oldukları öznitelikleri CityGML/TUCBS tarafından tespit ederek eşleştirme tablolarının oluşturulmasını hedefler. Örneğin IFC'deki *IfcWall*, *IfcRoof* gibi bir yapı elemanı CityGML tarafında LoD2 seviyesinde *WallSurface* veya *RoofSurface* gibi nesnelere, LoD4 seviyesinde ise *IntWallSurface* ya da *CeilingSurface* gibi daha detaylı temsillere ve özniteliklere karşılık gelebilmektedir. *IfcWall* nesnesi LOD 300 seviyesinde “BinaDuvarı” (LoD3) sınıfına eşlenerek malzeme bilgisi ve taşıyıcı fonksiyonu korunabilirken, LOD 350 seviyesindeki bir *IfcDoor* nesnesi, LoD4 sınıfına aktarılınca kapının açılma yönü gibi özellikleriyle birlikte semantik olarak korunması sağlanabilir. Ayrıca TUCBS şeması içinde doğrudan karşılığı bulunmayan IFC nesnelerinin belirlenmesine ve gerekli durumlarda yeni sınıf tanımları geliştirilmesine de olanak tanır.

2.5.1.2 Analiz Odaklı Nesne Eşleme

IFC'de yer alan özniteliklerin (ör. *Material*, *FireRating*, *LoadBearing*) hangi koşullarda korunacağı, sadeleştirileceği veya yazılmayacağı da kullanım senaryolarına göre sistematik biçimde dâhil edilebilir. Örneğin, görselleştirme odaklı bir uygulamada kiriş, kolon gibi yapısal elemanlar gereksiz olabilirken, yapısal analiz içeren bir CBS uygulamasında bu nitelikler korunmalıdır. Yangın tahliye analizi yapılacaksa *FireRating*, *OpeningDirection*, *IsExternal*, *Accessibility* gibi bazı kapı nitelikleri hayati öneme sahip olur. Oysa sadece mimari görselleştirme gerekiyorsa belki yalnızca *OverallWidth* ve *OverallHeight* gibi boyutsal veriler yeterlidir. Bu

durumda yapılması gereken analiz odaklı olarak sınıf eşleme ile özel bir alt küme çıkarılması olabilir.

2.5.2 Geometrik ve Semantik Dönüşüm Kurallarının Belirlenmesi

BIM verilerinin CBS ortamına doğru, eksiksiz ve anlamlı biçimde aktarılabilmesi için hem geometrik hem de semantik düzeyde dönüşüm kurallarını içeren bir yapı oluşturulabilir. Literatürde BIM–CBS entegrasyonuna yönelik pek çok yaklaşım geliştirilmiş olup bu çabalar ISO 19166 gibi belgelerde de genel bir çerçevede sınıflandırılmıştır. Her ne kadar bu yaklaşımlar yöntemsel farklılıklar gösterse de ortak hedef veri kaybını en aza indirerek doğru ve tutarlı bir aktarım gerçekleştirmektir. Bu doğrultuda önerilecek dönüşüm sistematığı, IFC ve CityGML tarafındaki veri yapılarının önceden tanımlanmış sınıf şemalarına dayanmalıdır. Yani her bir nesne türünün belirli bir adlandırma, hiyerarşi ve içerik standardına uygun olarak veri tabanında tutulması sağlanmalıdır. Dönüşüm işlemi öncesinde, IFC nesnelerinin sahip olduğu geometri tiplerinin (ör. B-Rep, *SweptSolid*, CSG) hangi CBS geometri türlerine karşılık geldiği ve bu dönüşümün hangi CityGML LoD seviyesinde gerçekleştirileceği açık biçimde tanımlanmalıdır. Oluşturulacak bu dönüşüm çerçevesi, kullanıcıların senaryoya özel ihtiyaçlarını da göz önünde bulundurabilmeleri adına detay seviyesi bazında esnek eşleştirme tabloları ve yönergeleri ile desteklenebilir.

2.5.3 Coğrafi Referanslama Kılavuzunun Oluşturulması

BIM verileri, nesnelerini kendi yerel koordinat sistemlerinde tuttuğu için CBS sistemlerinde kullanmadan önce coğrafi referanslama yapılması gerekmektedir. Bazı CBS yazılımları Revit/IFC modellerini doğrudan açıp öteleme ölçekleme gibi basit işlemlerle modeli istenen konuma taşımaya imkân sunmaktadır. Fakat bu işlemlerde model kalıcı olarak coğrafi referanslanamaz. Bunun için literatürde farklı yaklaşımlar Bölüm 5’te detaylıca anlatılmıştır. IFC modellerinin coğrafi referanslanmasına yönelik işlem adımları ve yöntemler bir rehber oluşturularak anlatılabilir. Ayrıca CityGML modelleri içinde yine benzer kılavuzlar hazırlanmalıdır. Hazırlanacak coğrafi referanslama kılavuzlarında IFC ve CityGML modelleri için ayrı bölümler yer almalıdır. IFC tarafında kullanılan sürüme göre hangi varlıkların tercih edileceği (örn.

IfcSite, *IfcMapConversion*, *IfcProjectedCRS*) açıkça tanımlanmalıdır. Koordinat sisteminin EPSG kodu ve düşey datum bilgisi net şekilde belirtilmelidir. Öteleme, yön ve ölçek değerlerinin ise standart biçimde doldurulması sağlanmalıdır.

CityGML tarafında ise CRS tanımının *gml:srsName* özniteliğiyle nasıl verileceği açıklanmalı, farklı LoD seviyelerinde georeferansın nasıl korunacağı gösterilmeli ve Türkiye’de kullanılan projeksiyon sistemlerinin CityGML çıktılarında hangi şekilde tanımlanacağına dair örnekler sunulmalıdır. Böylece her iki veri modelinde de coğrafi konum bilgisi tutarlı biçimde saklanabilir hale getirilecektir.

2.5.4 Web Tabanlı 3B BIM Verisi Yayınlama Altyapısı

BIM içeriğinin CBS ortamlarında doğrudan kullanılabilir hâle gelmesi için, OGC API – Features, Tiles ve 3D gibi modern servis protokollerinin desteklenmesi kritik öneme sahiptir. IFC dosyalarının WFS/WMS gibi geleneksel servislerle değil, OGC 3D Tiles ya da Esri I3S (*Indexed 3D Scene Layers*) gibi 3B veri odaklı formatlarla da sunulabilmesi için gerekli teknik altyapı hazırlanmalıdır. Örneğin, Cesium platformunda kullanılan *Design Tiler* ve Revit eklentisi, IFC modellerini semantik ve geometrik bileşenleriyle doğrudan 3D Tiles formatına dönüştürmekte ve yüksek performanslı olarak web ortamında yayınlamaktadır (Şekil 2. 16) [58]. Benzer şekilde, I3S BSL (*Building Scene Layer*) formatı, CityGML ve BIM içeriklerinin hiyerarşik yapısını, malzeme ve ilişki bilgilerini koruyarak yayınlama kapasitesine sahiptir [59].

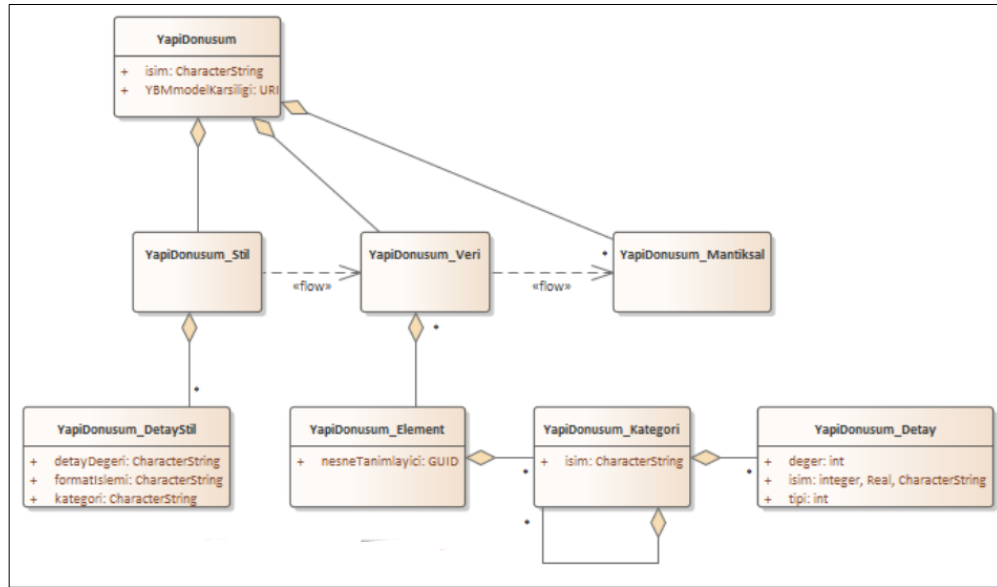
Şekil 2.16 Cesium Design Tiler Eklentisi BIM Modelinin 3D Tiles Formatına Dönüştürülmesi [60]



2.5.5 TUCBS ile BIM Modellerinin Eşlenmesi

TUCBS sisteminin IFC tabanlı BIM verileriyle entegrasyonuna yönelik geliştirilen kavramsal şemalarda, GUID (*Global Unique Identifier*) kavramının doğrudan kullanıldığı ve her yapı elemanının nesneTanimlayici: GUID niteliğiyle tanımlandığı görülmektedir (Şekil 2.17).

Şekil 2.17 Yapı Modeli- Bina 3B Eşleştirme Şeması [56]



Bina düzeyindeki IFC modellerinde kimlik bütünlüğünün sağlanabilmesi için, TUCBS No'nun, IFC modelinde yer alan *IfcBuilding* sınıfının *Pset_BuildingCommon.BuildingID* alanına eklenmesi gerekmektedir. TUCBS No, MAKS Yapı Kimlik Numarası (YKN) ve UAVT Kimlik Numarası ile entegre biçimde çalışan bir tanımlayıcıdır. Aynı binaya ait CBS ve BIM verilerinin bu kimlik üzerinden ilişkilendirilmesi, kurumsal sistemler arasında doğrudan uyum ve veri bütünlüğü sağlayacaktır. Böylece binaya ait geometrik, yapısal ve idari bilgilere her iki ortamda da tutarlı biçimde erişim mümkün hale gelecektir.

2.5.6 TUCBS Verilerine Özgü IFC-MVD Tanımı Geliştirilmesi

IFC, yapıların tüm yaşam döngüsünü kapsayan oldukça geniş ve ayrıntılı bir veri şemasıdır. Fakat her kullanım senaryosu, bu geniş yapının tamamını gerektirmez. IFC nesneleri belirli bir kullanım amacına uygun olarak Model Görünüm Tanımları

(*Model View Definition, MVD*) yapısıyla tanımlanır. MVD’ler, hangi IFC sınıf ve özniteliklerinin dâhil edileceğini belirleyerek veri paylaşımında hem bütünlük hem de anlam birliği sağlar. Örneğin, tasarım koordinasyonu için geliştirilen *Coordination View 2.0*, en yaygın kullanılan MVD’lerden biridir.

TUCBS ile uyumlu BIM verisi üretimini kolaylaştırmak için Türkiye’ye özgü bir IFC MVD tanımlanması oluşturulması gerekmektedir. Bu özel yapı yalnızca TUCBS şemasında karşılığı bulunan nesneleri ve öznitelikleri içermelidir. Örneğin *IfcBuilding*, *IfcWall*, *IfcRoof*, *IfcDoor*, *IfcSpace* ve *IfcSlab* gibi öğeler, TUCBS’teki Bina, Tesisat ya da Yapı Elemanları temalarıyla doğrudan eşleşmektedir. Her bir nesne için uygun geometri tipi (ör. *Solid*, *Surface*) ve temel nitelikler (*GlobalId*, kat numarası, kullanım amacı, malzeme bilgisi gibi) tanımlanarak bir çıktı şablonu oluşturulabilir. Öznitelik düzeyindeki teslim kuralları (örn. *GlobalId* zorunlu, kullanım amacı için kod listesi, malzeme bilgisi şeması) ise buildingSMART’ın önerdiği Bilgi Teslim Şartnamesi (*Information Delivery Specification, IDS*) yaklaşımıyla uyumlu bir biçimde modellenmelidir. Uluslararası birlikte çalışabilirlik açısından bu yaklaşım büyük önem taşır. Aksi takdirde, yalnızca Türkiye içinde geçerli olacak sınırlı bir standart haline gelme riski bulunmaktadır [61]. Oluşturulan bu yapı Revit, Archicad, Allplan gibi BIM yazılımlarının TUCBS uyumlu veri üretmesini sağlar. Ortak şema sayesinde kurumlar arası uyum sağlanır ve dijital inşaat süreçlerinde veri paylaşımı kolaylaşır.

2.5.7 BIM ve CBS Entegrasyonu Rehberi Oluşturulması

TUCBS ile BIM entegrasyonunun sahada etkili şekilde yaygınlaşabilmesi için, kullanıcıların ihtiyaçlarını karşılayan kapsamlı ve anlaşılır dokümanlar oluşturulmalıdır. Örneğin “Kamu, Kurum ve Kuruluşları için TUCBS–BIM Entegrasyonu Rehberi” ya da “TUCBS Uyumlu IFC Modelleme Kılavuzu” gibi teknik kılavuzlar hazırlanabilir. Bu kılavuzlarda veri modelleme ilkeleri, standartlara uygunluk koşulları, IFC–TUCBS eşleştirme yöntemleri ve paylaşım protokolleri açık biçimde ortaya konmalıdır.

Uygulamaya dönük eğitim içerikleri de bu sürecin destekleyici bir parçası olacaktır. Kamu kurumları, özel sektör temsilcileri ve akademik kullanıcılar için ayrı

ayrı yapılandırılmış, erişilebilir ve ücretsiz eğitim setleri hazırlanarak teorik bilgilerin pratikte nasıl uygulanacağı adım adım gösterilebilir. Kılavuz ve eğitim içerikleri teknik bilgi düzeyini artırmanın ötesinde, kamu ve özel sektör arasında ortak terminoloji ve yöntemlerin benimsenmesini kolaylaştırır. Böylece BIM–CBS entegrasyonu uygulama süreçlerinde ve kurumsal düzeyde daha kalıcı ve sürdürülebilir bir temele oturmuş olur.

2.5.8 IFC'den CityGML'e Dönüşüm Şemalarının Oluşturulması

IFC verilerinin CityGML formatına hem geometri hem de semantik olarak doğru biçimde aktarılabilmesi için standartlaşmış bir dönüşüm iş akış şemasının oluşturulması önemlidir. Bu iş akışları, verilerin yapısını koruyarak LoD seviyelerine göre sadeleştirilmesini ve TUCBS Bina Teması sınıflarıyla uyumlu şekilde dönüştürülmesini kolaylaştıracaktır. FME Workbench üzerinde hazırlanacak veri işleme senaryoları ile Python tabanlı ETL(*Extract–Transform–Load*)⁶ komutları, IFC verilerinin TUCBS şemasına otomatik ve denetlenebilir biçimde aktarılması için kullanılabilir.

Standartlaşmış yapılar, ulusal ölçekte uygulama birliği ve veri standardizasyonunu güçlendirir. Belediyeler, proje ofisleri ve yüklenici firmalar gibi paydaşların veri dönüşüm süreçleri daha kolay ilerler. Böylece teknik engeller azalır, BIM–CBS entegrasyonu daha geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşır ve sürdürülebilir bir dönüşüm altyapısı oluşur.

⁶ **ETL**(*Extract–Transform–Load*/Çıkar–Dönüştür–Yükle), farklı kaynaklardan alınan verinin iş kurallarına göre dönüştürülerek hedef şemaya yüklenmesini sağlayan yerleşik veri entegrasyonu yaklaşımıdır.

BÖLÜM 3

BİM'E YÖNELİK ULUSAL POLİTİKALAR VE KAMU KURUMLARININ ÇALIŞMALARI

Üçüncü bölümde, Türkiye’de BİM’e yönelik ulusal politika belgeleri, mevzuat düzenlemeleri, kamu kurumlarının yürüttüğü uygulamalar ve geçiş sürecine ilişkin teknik ve kurumsal altyapı bütüncül olarak ele alınmıştır. 12. Kalkınma Planı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2024–2028 Stratejik Planı ile Ulusal Coğrafi Bilgi Stratejisi ve Eylem Planı gibi üst ölçekli belgelerde, BİM’in dijitalleşme, sürdürülebilirlik, afetlere direnç ve enerji verimliliği hedefleri doğrultusunda stratejik bir araç olarak konumlandırıldığı görülmektedir. Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği değişiklikleri ve e-Proje Yönetim Sistemi Protokolü ile BİM tabanlı proje teslimine yasal zemin kazandırılmış ve dijital ruhsatlandırma, merkezi veri yönetimi ve standart teslim süreçlerine yönelik adımlar atılmıştır.

Bakanlığın Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü ve Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü tarafından BİM kapsamında yürütülen teknik ve stratejik odaklı çalışmaları, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü’nün CityGML tabanlı 3B şehir modelleri ve kadastro uygulamaları, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı’nın altyapı projeleri için geliştirdiği BİM Teknik Şartnamesi, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın enerji verimliliği ve sürdürülebilir tasarım hedefleri doğrultusundaki BİM odaklı uygulamaları ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi’nin raylı sistemler ile dijital ruhsat süreçlerindeki BİM uygulamaları öne çıkan örneklerdir.

Ulusal BİM Çalıştayı bulguları, Türkiye’nin BİM benimseme sürecindeki güçlü ve zayıf yönleri ile fırsat ve tehditleri ortaya koyulmuştur. Kamu liderliği, ortak çerçeve oluşturma, sektörel kapasite geliştirme ve vizyonun yaygınlaştırılması gibi başlıklar altında kısa, orta ve uzun vadeli eylemler tanımlanmıştır. Türkiye’de BİM’e geçişin stratejik temelleri, karşılaşılan zorluklar ile dijitalleşme sürecinin gereklilikleri incelenmiştir. e-Proje Yönetim Sistemi oluşturulması kapsamındaki dokümanlar incelenmiş PDF tabanlı teslimden IFC formatındaki BİM modellerine, yapı ruhsat dijitalleşme süreci üzerinden uzun vadeli dijital inşaat vizyonu somutlaştırılmıştır.

3.1 BIM Kullanımının Ulusal Strateji Politikalarındaki Yeri

3.1.1 Cumhurbaşkanlığı On İkinci Kalkınma Planı

Cumhurbaşkanlığı On İkinci Kalkınma Planı, Türkiye’de dijital inşaat ekosisteminin dönüşümünde BIM teknolojisini stratejik bir araç olarak tanımlamaktadır. Enerji verimliliği, sürdürülebilir malzeme kullanımı, afetlere dayanıklı kent planlaması, yaşam döngüsü temelli tasarım ve akıllı bina çözümleri gibi çok boyutlu hedefler ortaya koymuştur. Kamu yapılarında enerji tasarrufu uygulamaları yaygınlaştırılırken geri dönüştürülebilir sistemler ve izlenebilir bina performansı sağlayan akıllı tasarımlar da desteklenmektedir [62].

“Yeşil ve Dijital Dönüşümle Rekabetçi Üretim” hedefi doğrultusunda şekillenen “3.2.3.11. İnşaat, Mühendislik-Mimarlık, Teknik Müşavirlik ve Müteahhitlik Hizmetleri” başlığı altında yer alan 637. madde ile inşaat ekosisteminde dijitalleşmenin artırılması açık bir politika hedefi olarak tanımlanmıştır. Bu doğrultuda 637.1 numaralı tedbirde, başta kamu alımları olmak üzere yapı bilgi modellemesi (BIM) ve yaşam döngüsü analizi gibi dijital tasarım ilkelerinin kademeli şekilde zorunlu hale getirileceği belirtilmiştir. 637.2 numaralı tedbirde, dijital proje teslimi ve otonom proje kontrolü gibi araçların kullanımına yönelik hukuki altyapının oluşturulması öngörülmüş, 637.3 numaralı tedbirde ise Nesnelerin İnterneti (*Internet of Things, IoT*) teknolojilerinin inşaat süreçlerine entegrasyonu teşvik edileceği ifade edilmiştir [62].

Bu tedbirlere yönelik faaliyetler kapsamında, 637.1.1’in altında Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) entegrasyonuna ilişkin bir strateji belgesi ve ilgili mevzuatın hazırlanması planlanmaktadır. 637.1.2 faaliyetinde BIM Portal altyapısının oluşturulması ve geliştirilmesi öngörülmekte, 637.1.3 faaliyetinde ise tüm paydaşların erişimine açık bir iletişim, eğitim ve uygulama ağı kurulması, kamu ve özel sektörün BIM kapasitesini artırmaya yönelik destekleyici çalışmaların yürütülmesi hedeflenmektedir [63].

Kalkınma Planı’nda yer alan afet risklerine karşı yapı güvenliğini artırmak, enerji verimliliğini sağlamak, sürdürülebilir ve izlenebilir malzeme kullanımını teşvik

etmek ve dijital süreçlerle üretkenliği artırmak gibi çok boyutlu hedeflerin önemli bir bölümü, BIM teknolojisinin bina kavramı üzerindeki yetenekleri ile karşılanabilmektedir.

Tüm bu faaliyetler, Türkiye’de BIM uygulamalarının sadece teknik bir dönüşüm olarak değil kurumsal kapasiteyi geliştiren, sektörel dijitalleşmeyi yönlendiren stratejik bir araç olarak konumlandırıldığını göstermektedir.

3.1.2 Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Stratejik Planı

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın 2024–2028 Stratejik Planı, Türkiye’nin çevresel sürdürülebilirlik, afet direnci ve dijitalleşme doğrultusunda şekillenen dönüşüm sürecine yön verirken, BIM teknolojisinin rolünü görünür kılacak birçok hedef içermektedir. Yeşil bina uygulamalarının yaygınlaştırılması, enerji verimliliği ve döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda sıfır atık yaklaşımı ile sürdürülebilir malzeme kullanımının teşvik edilmesi bu hedefler arasındadır. Ayrıca afetlere dayanıklı yerleşimlerin oluşturulması, güvenli yapılaşma için mekânsal planlama araçlarının güçlendirilmesi ve akıllı şehir çözümleriyle desteklenen veri odaklı yönetim modellerinin geliştirilmesi de plan kapsamında öncelik verilen başlıklardandır [64].

Amaç 5, “Çevre ve iklime duyarlı yeşil binaları yaygınlaştırmak, mesleki yetkinliği geliştirmek” başlığı altında tanımlanan Hedef 5.3 doğrultusunda inşaat sektöründe dijitalleşmenin desteklenmesi, yapı malzemelerinde piyasa gözetimi ve denetiminin sağlanması ile mesleki yetkinliğin artırılması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, Ulusal Yapı Bilgi Modellemesi Entegrasyonu için teknik ve mevzuat altyapısının oluşturulması, BIM tabanlı e-Proje Teslim sisteminin geliştirilmesi ve yapı ruhsatı eki projelerin sayısal olarak üretilip elektronik ortamda kontrol edilerek merkezi bir veri altyapısına kaydedilmesi hedefleri belirlenmiştir [64].

Stratejik plandaki hedefler, BIM’in yalnızca tasarım sürecine hizmet eden bir araç olmadığını aynı zamanda güvenli yapılaşma, denetim şeffaflığı ve dijital yönetim sistemleri için temel bir altyapı bileşeni olarak değerlendirildiğini ortaya koymaktadır. Bu değerlendirme, BIM’in sunduğu bütüncül veri yönetimi, yaşam döngüsünü izleme

imkânı, sürdürülebilir tasarımı destekleyen yapısı ve mekânsal sistemlerle entegre çalışma yeteneğiyle örtüşmektedir. Söz konusu nitelikler sayesinde BIM, belirlenen politikaların dijital altyapı üzerinden daha izlenebilir, etkili ve uyumlu biçimde uygulanmasına katkı sağlar.

3.1.3 Ulusal Coğrafi Bilgi Stratejisi ve Eylem Planı

CBSGM, 19 Şubat 2025 tarihli ve 32818 (Mükerrer) sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan “2024–2030 Ulusal Coğrafi Bilgi Stratejisi ve Eylem Planı” doğrultusunda beş ana amaç belirlenmiştir. Bu amaçlara bağlı olarak 26 hedef ve toplamda 101 eylem tanımlanmıştır [65]:

- **Amaç 1**, Ulusal CBS’nin e-Devlet ile tam entegre edilmesi,
- **Amaç 2**, Coğrafi bilgi endüstrisinin büyütülmesi ve yenilikçiliğin teşvik edilmesi,
- **Amaç 3**, CBS veri ve servis kapasitesinin güçlendirilmesi,
- **Amaç 4**, CBS farkındalığının toplum genelinde yaygınlaştırılması,
- **Amaç 5**, CBS süreç gelişiminin izlenmesi ve sürekli iyileştirilmesi.

Amaç 2 içerisinde yer alan “Eylem 2.1.8 - 3B Veri Standartlarının Gelişen Teknolojiye Uygun Olarak Güncellenmesi” ile “Eylem 2.1.9 - Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) Standartlarının Geliştirilmesi” şeklinde hedefler belirtilmiştir. Bu eylemler:

-Eylem 2.1.8, mevcut üç boyutlu veri standartları kapsamında veri türleri, dosya formatları ve işleme yöntemlerinin belirli aralıklarla gözden geçirilerek güncellenecektir. 3B verilerin birlikte çalışabilirliği, uyumluluğu, erişilebilirliği artırıp daha paylaşılabılır ve işlenebilir olması sağlanacaktır [65].

-Eylem 2.1.9, ülke genelinde BIM teknolojisinin yaygınlaştırılmasına yönelik standartların oluşturulmasını amaçlamıştır. Tasarım, yapım ve işletme süreçlerine ait tüm yapı bilgilerinin dijital ortama aktarılmasıyla, bu verilerin görselleştirme, analiz ve simülasyon gibi farklı amaçlar doğrultusunda kullanılabilmesi sağlanacaktır. Sektördeki tüm paydaşların ortak bir terminoloji ile verilerini uyumlu bir şekilde paylaşması, süreç boyunca veri bütünlüğü korunması ve entegrasyonun kolaylaştırılması hedeflenmektedir [65].

Her iki eylem de Türkiye’de BIM teknolojisinin yaygınlaşması ve standartlara dayalı olarak ortak bir yapıda birleşmesi için oldukça önemlidir. Özellikle 3B veri standartlarının güncellenmesi ve BIM’e özgü standartların tanımlanması ile Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü’nün ulusal çapta hem teknik altyapının oluşturulması hem de veri bütünlüğü ve birlikte çalışabilirliğin sağlanması açısından sadece yönlendirici değil politika belirleyici ve standart koyucu bir rol üstleneceğini de göstermektedir.

3.1.4 Planlı Alanlar İmar Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik

11 Mart 2025 tarihinde Resmî Gazete’de yayımlanan değişiklikle Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği’nin 5. maddesine aşağıdaki fıkra eklenmiştir:

“(30) Bakanlıkça belirlenecek projelerde uygulanmak üzere yapı ruhsatı eki proje, resim, hesap ve raporlar; Bakanlıkça belirlenecek esaslara, ilgili yapı bilgi modellemesi (BIM) standartlarına uygun şekilde ve sayısal olarak Bakanlıkça veya yetkilendireceği idarelerce elektronik ortamda tesis edilecek veri altyapısına kaydedilir, elektronik ortamda kontrol edilir, onaylanır ve saklanır. Otomasyon sistemi üzerinden yapılacak işlemler için bu maddede yazılı belgelerin basılı olma şartı aranmaz.” [66]. Bu fıkroda belirtilenler, Türkiye’de BIM tabanlı proje üretimi ve tesliminin ilk kez yasal düzeyde zorunluluk haline getirilmesi açısından kritik bir dönüm noktasıdır.

3.2 BIM Teknolojisi Kapsamında Kamu Kurum ve Kuruluşlarının Çalışmaları

3.2.1 Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü

3.2.1.1 Yapı Bilgi Modellemesi Uygulama Rehberi

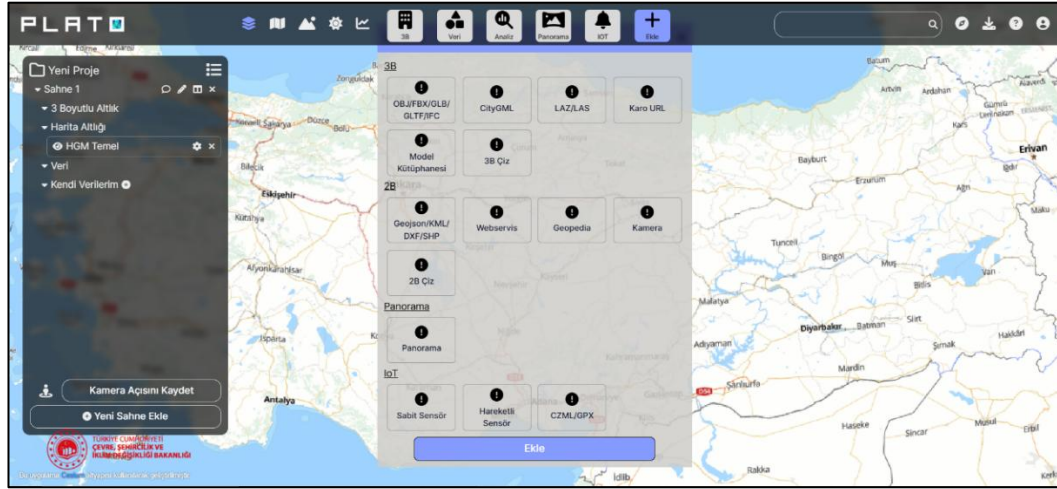
Şubat 2024’te “Yapı Bilgi Modellemesi Uygulaması Akıllı Şehir Rehberlik Kılavuzu” yayımlanmıştır. Kılavuz, akıllı şehirlerde Yapı Bilgi Modellemesi uygulamalarının nasıl hayata geçirileceğine dair kapsamlı bir yol haritası sunmaktadır. İlk bölümde YBM’nin tanımı yapılmış proje süresi, uygulama alanı ve hedefler çerçevesinde teknik bileşenler, proje girdileri, beklenen çıktılar ve performans

göstergeleri açıklanmıştır. Devam eden bölümlerde yaşam döngüsü yaklaşımı, federe model mantığı, CBS ve IoT entegrasyonu, LOD seviyeleri, dijital ikiz ve Şehir Bilgi Modellemesi gibi temel kavramlar ele alınarak uygulamanın kapsamı ve gerekçesi ortaya konmaktadır. Kılavuzda İngiltere, Singapur, Çin ve Hollanda gibi ülkelerin yanı sıra İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 3. Havalimanı ve EMAAR projeleri gibi Türkiye’den örneklerle mevcut durum değerlendirilmiştir. Teknik analiz bölümünde fiziksel ve mekânsal büyüklük, kapasite, yazılım-donanım ihtiyaçları ile süreç yönetimi ve iş akışları ele alınmış, finansal analizde maliyet kabulleri, danışmanlık, yazılım-donanım giderleri ve örnek bir vaka çalışması üzerinden yapılan hesaplamalara yer verilmiştir. Ekonomik analiz kısmında istihdam, AR-GE gibi başlıklar değerlendirilirken sosyal analizde ise kamu ve özel sektör iş birliği, koordinasyon süreçleri ve bürokrasinin azaltılması gibi kazanımlar öne çıkarılmıştır. Çevresel analiz kısmında kaynak verimliliği, atık azaltımı ve CBS entegrasyonu ile doğal çevrenin korunmasına odaklanmaktadır. Risk analizi bölümünde potansiyel sorunlar tartışılmıştır. Genel sonuç kısmında ise YBM’nin Türkiye için stratejik önemi ve geleceğe yönelik öneriler sıralanmaktadır. Örneğin daha hızlı karar alma, afetlere hazırlık, kaynak yönetimi ve ekonomik kalkınma gibi konularda stratejik katkılar sunduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak bu rehber, içeriği ve yaklaşımıyla dijitalleşme sürecinde kurumlara yön gösteren teknik ve stratejik bir referans belge niteliği taşımaktadır [67].

3.2.1.2 PLATO Uygulaması

PLATO şehir modellerinin dijital ortamda 3 boyutlu olarak görselleştirilmesini ve analiz edilmesini sağlayan web tabanlı bir platformdur [68]. PLATO, IFC ve CityGML veri formatlarını desteklemesi sayesinde BIM–CBS entegrasyonunu teknik olarak mümkün kılan güçlü bir altyapı sunmaktadır. GeoJSON, KML, SHP ve DXF gibi yaygın coğrafi veri formatlarıyla uyumludur (Şekil 3.1).

Şekil 3.1 PLATO Uygulamasının Genel Görünümü [69]



Türkiye’de bu ölçekte çalışan az sayıdaki örnekten biri olması, PLATO’yu teknik ve stratejik açıdan önemli bir konuma taşımaktadır. Sahip olduğu bu yeteneklerle, BIM verilerinin kent düzeyinde değerlendirilebildiği nadir uygulamalardan biri hâline gelmektedir [68].

Not: CBSGM tarafından yapılan TUCBS 3B Bina teması kapsamındaki IFC eşleşmeleri, tezin ikinci bölümünde anlatıldığı için kurumsal çalışmaların anlatıldığı bu başlıkta tekrar değinilmemiştir.

3.2.2 Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü

Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü (MHGM) BIM odaklı olarak çok boyutlu bir politika, uygulama ve süreç yürütmektedir. Ulusal düzeyde strateji ve mevzuat geliştirmeyi hedeflerken, pilot projeler aracılığıyla uygulama pratiği kazandırmayı amaçlamaktadır.

Bakanlık bünyesinde 2019 yılında TSE nezdindeki MTC 177 Yapı Bilgi Modellemesi Ayna Komitesi’ne temsilci gönderilmiş, 2020’de BIM Çalışma Grubu kurulmuş, aynı yıl buildingSMART Türkiye iş birliğiyle sektörde farkındalık etkinlikleri düzenlenmiştir. 2021’de İTÜ SEM iş birliğiyle 112 teknik personele BIM eğitimi verilmiş, ayrıca YÖK’e BIM derslerinin üniversite müfredatına alınmasına yönelik tavsiye yazısı iletilmiştir. Bu çalışmalar Bakanlığın koordinasyonunda gerçekleştirilmiş, MHGM ise sürece ilgili birim olarak katkı sunmuştur.

Uygulama tarafında, MHGM tarafından yürütülen en önemli adımlardan biri, 2022’de Emlak Konut iş birliğiyle gerçekleştirilen 24 derslikli ortaokul projesi olmuştur. Türkiye’de Bakanlık bünyesine ait ilk BIM tabanlı pilot uygulamalardan biri olarak öne çıkan bu proje, kurumsal düzeyde BIM pratiği geliştirilmesine katkı sağlamıştır. Aynı dönemde Bakanlık, bağlı ve ilgili kurumlara yönelik “BIM Entegrasyonu ve Geçiş Yol Haritası” başlıklı sunumlarla kurumsal farkındalığı artırmaya yönelik çalışmalar da yürütmüştür.

BIM uygulamaları, On İkinci Kalkınma Planı (2024–2028) ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın 2024–2028 Stratejik Planı kapsamında yasal teminat altına alınmıştır. On İkinci Kalkınma Planının 637. maddesinde “İnşaat Ekosisteminde Dijitalleşmenin Artırılması” hedefi belirlenmiş, bu kapsamda kamu alımlarında yapı bilgi modellemesi ve yaşam döngüsü analizinin kademeli olarak zorunlu hale getirilmesi (637.1) ile dijital proje teslimi ve otonom proje kontrolü için hukuki altyapının oluşturulmasına (637.2) yönelik tedbirler MHGM sorumluluğunda yürütülmektedir (Şekil 3.2) [70].

Şekil 3.2 2024 Yılı Birim Faaliyet Raporunda MHGM'nin İlgili Faaliyetleri [70]

637.1.1.	1. Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) entegrasyonu için strateji belgesi ve mevzuat hazırlanacaktır.	Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü
637.1.2.	2. YBM portal alt yapısının hazırlanması ve geliştirilmesi sağlanacaktır.	Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü
637.1.3.	3. YBM portalı ile tüm paydaşların iletişim, eğitim, geliştirilmiş uygulamalar ve ağ alt yapısının oluşturulması sağlanacak, kamu ve özel sektörün YBM kapasitesini geliştirici faaliyetlerin yapılması desteklenecektir.	Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü

Ekim 2024’te Birleşik Krallık İş ve Ticaret Bakanlığı ile başlatılan Dijital İnşaat ve BIM iş birliği programı kapsamındaki çalışmalar MHGM tarafından yürütülmektedir. Şubat 2025’te, Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü’nün koordinasyonunda ve Birleşik Krallık’tan Connected Places Catapult (CPC) iş birliğiyle düzenlenen “Ulusal BIM Entegrasyonu Çalıştayı” kamu, özel sektör ve akademiden temsilcilerin bir araya gelmesi ile Türkiye’nin inşaat sektöründe dijitalleşmeye yönelik stratejik yol haritasının oluşturulmasına katkı sunmak amacıyla düzenlenmiştir (Şekil 3.3) [71].

Şekil 3.3 Ulusal BIM Entegrasyonu Çalıştayı Katılımcıları [71]



3.2.2.1 e-Proje Yönetim Sistemine Geçiş Projesi

MHGM ile İstanbul Teknik Üniversitesi arasında imzalanan “e-Proje Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi Protokolü”, yapı ruhsatı süreçlerinde dijitalleşmeyi hedefleyen stratejik bir iş birliğidir. Sürecin yürütülmesine CBSGM kurumsal düzeyde destek sağlamaktadır. Bu protokol kapsamında, 3194 sayılı İmar Kanunu’nun 22. maddesi uyarınca ruhsat başvurularında sunulan mimari, statik, elektrik ve tesisat projelerinin, resim ve hesapların teknik standartlara uygun biçimde sayısal olarak üretilmesi, teslim edilmesi ve dijital ortamda incelenmesini sağlayacak bir sistem altyapısının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Sistemin web tabanlı ve açık kaynaklı yapısıyla tüm paydaşların erişimine açık olması öngörülmektedir. Üç bileşenden oluşan projede;

- Mevcut yapı ruhsatı süreçlerinin analizi ve uluslararası e-Proje seviyelerinin tanımlanması,
- IFC ve LOD odaklı teslim kriterlerinin belirlenmesi,

- “BIM Portalı” üzerinden bilgi paylaşımının sağlanması ve sistem mimarisinin üst ölçekli planlarla uyumlu bir strateji belgesine dönüştürülmesi hedeflenmektedir.

Türkiye’de e-Proje Yönetim Sistemi, bu kurumsal iş birlikleri ile birlikte aşamalı olarak hayata geçirilmektedir. İlk aşama, 2B dijital proje teslimi esasına dayanmaktadır. Mimari, statik, elektrik ve mekanik projeler ile diğer belgelerin PDF veya DXF gibi dijital formatlarda hazırlanarak idarelere iletilmesi öngörülmektedir.

İkinci aşamada, 3B BIM tabanlı teslim süreci devreye girmektedir. Projelerin IFC formatında BIM modelleriyle sunulması ve ruhsat inceleme süreçlerinin bu modeller üzerinden yürütülmesi planlanmaktadır. Pilot uygulamaların öncelikle büyükşehirlerde başlaması, daha sonra ülke genelinde yaygınlaştırılması beklenmektedir.

Üçüncü aşama, yarı otomatik dijital kontrol mekanizmalarının devreye girmesidir. BIM modelleri imar mevzuatı ve teknik kriterler çerçevesinde tanımlanmış kurallar doğrultusunda dijital doğrulama sistemlerinden geçirilecektir.

Son aşamada ise, BIM–CBS entegrasyonu ile ruhsat süreçleri ve kent bilgi sistemleri arasında çift yönlü veri akışı sağlanacaktır. Böylece yapı verilerinin kent ölçeğinde izlenebilirliği artırılacak, akıllı şehir uygulamalarına zemin hazırlanacaktır.

Kurulacak sistemin temel amacı; mevcut yapı ruhsat süreçlerindeki parçalı işleyiş, kurumlar arası uyumsuzluklar ve zaman kayıplarını gidermektir. e-Proje Yönetim Sistemi, standartları belirlenmiş, şeffaf ve izlenebilir bir yapıyla Türkiye’nin dijital dönüşüm vizyonuna katkı sağlayacaktır [72].

3.2.3 Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü

Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) tarafından yürütülen “3B Şehir Modelleri ve 3B Kadastro Altlıklarının Oluşturulması Projesi”, Türkiye’de yapıların dijital ortama aktarılması ve kat mülkiyetinin üç boyutlu olarak tescil edilmesi sürecinde önemli bir yer tutar. 2021 yılında yürürlüğe giren yönetmelikle, kat mülkiyetine konu binalar için tapu siciline 3B dijital bina modelinin sunulması zorunlu

hâle getirilmiş ve bu kapsamda üretim süreçleri CityGML veri modeli temelinde standartlaştırılmıştır.

Şekil 3.4 Bir Binanın Fotogrametrik (Sol) ve Mimari (Sağ) 3B Modelinin Gösterimi [73]



TKGM'nin 3B bina modeli üretiminde, geometriler CityGML 2.0 veri modeline uygun olarak üç farklı detay seviyesinde (LoD0, LoD1 ve LoD2) oluşturulmaktadır. Fotogrametrik ve mimari tabanlı üretimlere (Şekil 3.4) yönelik olarak standartlaştırılan bu modelleme kuralları veri kalitesinin tutarlılığını ve sürekliliğini sağlamayı amaçlamaktadır [74]. Üretim çıktıları incelendiğinde, elde edilen modellerin detay seviyesi açısından LoD 2.5 düzeyine karşılık geldiği ifade edilebilmektedir.

Şekil 3.5 3B Kadastro Uygulaması [74]



TKGM 3B Harita Sunum Uygulaması (Şekil 3.5), harita üzerinde konum bazlı arama yaparak belirli bir parsel ya da bina üzerine erişim imkânı sunar. Türkiye’de pilot olarak seçilen bazı şehirler (Amasya ve Kütahya) için detaylı 3B bina modelleri sunulmaktadır. 3 boyutlu verileri CityGML, CityJSON, KML, Collada ve 3Dpdf gibi farklı formatlar ile dışa aktarabilmektedir. Aynı zamanda öznetelik bazında (bina yüksekliği, çatı alanı vb.) 3B sorgulama aracı bulunmaktadır. TKGM görsel sunumların yanı sıra analitik uygulamalar için de yüksek uyumlulukta 3B şehir verisi üretmekte ve bu veriler, MAKS ve TAKBİS gibi ulusal sistemlerle entegre edilebilir hâle gelmektedir [75].

Henüz BIM/IFC tabanlı modelleme ve tescil süreçlerine ilişkin kurumsal bir uygulama hayata geçmemiş olsa da ihtiyaç doğrultusunda bu geçiş sağlanabilir. Mevcut durumda ise, kurumun üç boyutlu yasal ve fiziksel temsil uygulamaları ağırlıklı olarak CityGML veri modeli üzerinden yürütülmektedir.

3.2.4 Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı (UAB), büyük ölçekli yapım ihalelerinde BIM süreçlerinin kurumsal düzeyde standartlaştırmak amacıyla 2022 yılında “BIM Teknik Şartnamesi ve İhale Dokümanları” başlıklı bir rehber yayımlamıştır. 3B modelleme, bilgi yönetimi, çakışma kontrolleri, metraj ve maliyet tahminleri, mühendislik analizleri ve CBS entegrasyonu gibi birçok sürecin bütüncül biçimde ele alındığı çok katmanlı bir uygulama çerçevesi sunmaktadır [76].

Şartname ile birlikte, her projede bir Ortak Veri Ortamı (*Common Data Environment, CDE*) kurulması zorunlu tutulmuş ve CDE’de yer alacak tüm proje dokümanlarının (2B çizimler, BIM modelleri, analiz çıktıları vb.), ISO 19650-1’de tanımlanan belge yaşam döngüsüne uygun olarak yönetilmesi belirtilmiştir. Tüm BIM modellerinin TS EN ISO 19650 standartları doğrultusunda ITRF96 koordinat sisteminde üretilmesi ve IFC, DWG, GML gibi CBS yazılımlarıyla uyumlu formatlarda teslim edilmesi istenmiştir [76].

BIM süreçlerinin yalnızca tasarım aşamasıyla sınırlı kalmaması, 4B planlama, yapım süreci veri aktarımı ve işletme dönemine kadar genişletilmesi hedeflenmiştir.

Yüklenicilere model tabanlı iş programı entegrasyonu (WBS–4D⁷ senkronizasyonu), çakışma analizi matrisleri, metraj tabloları (QTO⁸, MTO⁹), kalite kontrol formları ve LOD–LOIN teslim tabloları gibi sorumluluklar yüklenmiştir. Her projede ayrıca BIM Yöneticisi, BIM Tasarım Yöneticisi, BIM Planlama Uzmanı ve CBS Sorumlusu gibi nitelikli personelin görevlendirilmesi zorunlu tutulmuş ve pozisyonlara ilişkin görev tanımları ayrıntılı şekilde belirlenmiştir [76].

Sonuç olarak, geliştirilen bu kapsamlı şartname ile birlikte UAB, altyapı projelerinde BIM’i, görselleştirmenin yanısıra bilgi temelli bir yönetim süreci olarak konumlandırmıştır. Böylece Türkiye’de kamu sektöründe dijital inşaat uygulamalarının kurumsal temelleri net bir çerçeveye tanımlanmış ve sektöre yön verecek örnek bir model ortaya konmuştur.

3.2.5 Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

Kasım 2022’de Türkiye tarafından güncellenerek sunulan Ulusal Katkı Beyanı, Paris Anlaşması çerçevesinde emisyon azaltım hedeflerini sektörel düzeyde tanımlayan stratejik bir belgedir. Bina sektörü için, enerji verimliliğini odağına alan dijital ve entegre çözümler özel bir önem taşımaktadır. Mevcut ve yeni binalarda enerji tasarrufunu önceleyen uygulamaların yaygınlaştırılması, BIM ve modüler inşaat gibi ileri tekniklerin geliştirilmesi ve teşvik edilmesi, sürdürülebilir yapılaşma hedeflerine yönelik somut hedefler öne çıkmaktadır [77, 78].

Türkiye’nin 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda hazırlanan 2030 Stratejisi ve II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı’nda yer alan “Kamu Binalarında Enerji Verimliliğinin Geliştirilmesi ve Enerji Dönüşümünün Sağlanması” başlıklı 3. eylem kapsamında, yeni projelendirilecek kamu binaları için sürdürülebilirlik odaklı tasarım ilkelerini içeren kılavuz ve kontrol listeleri hazırlanması sağlanacaktır. Söz konusu binaların yapımında Bütünleşik Bina Tasarımı, Bina Enerji Modelleme, Bina

⁷ **WBS–4D (Work Breakdown Structure–4D)**, Proje bileşenlerinin yapısal olarak ayrıldığı iş kırılım yapısının (WBS), zaman boyutu (4D) ile ilişkilendirilmiş hâlidir. BIM modelleri ile entegre edilerek inşaat süreçlerinin zamana bağlı simülasyonu yapılmasına olanak tanır.

⁸ **QTO (Quantity Take-Off)**, BIM modelinden otomatik veya yarı otomatik olarak çıkarılan ölçü ve metraj verilerini ifade eder. Malzeme, hacim, alan gibi miktarların hızlı ve tutarlı şekilde hesaplanmasını sağlar.

⁹ **MTO (Material Take-Off)**, İnşaatla kullanılacak malzemelerin tür ve miktarlarının belirlenmesine yönelik listedir. Genellikle malzeme bazlı maliyet hesapları ve tedarik planlaması için kullanılır.

Yönetim Sistemi ve BIM gibi dijital yaklaşımların bütüncül biçimde değerlendirilmesi hedeflenmiştir [78].

3.2.6 İstanbul Büyükşehir Belediyesi

İstanbul Büyükşehir Belediyesi BIM'i özellikle raylı sistem yatırımlarında artık bir tercih değil kurumsal bir norm olarak benimsemiştir. Raylı Sistemler Daire Başkanlığı tarafından, 2015 yılından itibaren tüm tasarım ve inşaat süreçlerinin kademeli olarak model tabanlı yürütülmesi zorunlu hâle getirilmiştir. Böylelikle teknik doğruluk artırılmış, iş akışlarının daha şeffaf bir yapıya kavuşması sağlanmıştır. Örneğin, Dudullu–Bostancı ile Kabataş–Mecidiyeköy–Mahmutbey hatlarında tasarım, yapım ve işletme evrelerinin tek bir dijital model içinde bütünleştirilmesi sağlanmış, saha verilerinin dijital ikiz altyapısı aracılığıyla gerçek zamanlı olarak yönetilmesi mümkün hâle getirilmiştir. Şubat 2024'te buildingSMART Türkiye iş birliğiyle yayımlanan “Raylı Sistemler BIM Teknik Şartnamesi” aracılığıyla BIM süreçleri resmî olarak standardize edilmiştir. Şartnamede tasarım, yapım ve işletme aşamalarına ilişkin BIM gereksinimlerinin yanı sıra paydaşların sorumlulukları da açık biçimde tanımlanmış, yüklenicilerin nitelikli BIM ekipleri kurmaları, BIM Uygulama Planı sunmaları ve verileri Ortak Veri Ortamı'nda sürekli olarak güncel tutmaları zorunlu tutulmuştur. 2021 yılında başlatılan “BİMİST: Ruhsat Süreçlerinin Dijitalleştirilmesi” girişimiyle birlikte imar alanına da taşınmıştır. Kamu projelerinden başlanarak tüm yapıların BIM şartnamesine uygun olarak dijitalleştirilmesi, ruhsat kontrollerinin otomasyon aracılığıyla şeffaf biçimde yürütülmesi ve kentin dijital ikizine sürekli veri akışı sağlanması amaçlanmıştır [79].

3.3 Ulusal BIM Çalıştayı Çıktılarının İncelenmesi

Şubat 2025'te, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı öncülüğünde ve Birleşik Krallık İş ve Ticaret Departmanı destekli Connected Places Catapult iş birliğiyle, Türkiye'de Ulusal BIM Entegrasyonu'na yönelik kapsamlı bir çalıştay düzenlenmiştir. On İkinci Kalkınma Planı ve Bakanlık Stratejik Planı'nda da yer alan dijital inşaat dönüşüm hedeflerine katkı sağlamayı amaçlayan bu etkinlikte kamu kurumları, üniversiteler ve özel sektör temsilcileri bir araya gelmiştir [80].

Katılımcılarla birlikte mevcut durum analiz edilmiş güçlü ve zayıf yönler, fırsatlar ve riskler değerlendirilmiş, kısa ve uzun vadeli hedefler doğrultusunda etkileşimli grup çalışmaları yürütülmüştür. Çalıştay, dijital inşaat dönüşümünü kurumsal ve ulusal stratejilerle uyumlu hâle getirme yönünde önemli bir adımdır. Öne çıkarılanlar arasında dijital dönüşüm sürecini yönetecek bir Dijital İnşaat Dönüşüm Ofisi'nin kurulması, ulusal ölçekte iletişim ve farkındalık stratejisinin geliştirilmesi, ISO 19650 standartlarıyla uyumlu teknik altyapının oluşturulması ve pilot projeler ile kurumsal kapasitenin güçlendirilmesi yer almıştır. Geçiş süreci teknolojik dönüşümle beraber sektördeki iş alışkanlıklarının da değişimini beraberinde getirecektir. Proje paydaşları arasında iş birliğine dayalı çalışma modellerinin geliştirilmesi, bilgi paylaşımına açık dijital altyapıların kurulması ve yasal düzenlemelerin bu süreci destekleyecek şekilde yapılandırılması büyük önem taşımaktadır [80].

Uluslararası ihalelerde BIM kullanımının giderek zorunlu hale gelmesi, Türk inşaat firmalarının küresel rekabet gücünü koruyabilmesini güçleştirmektedir. Öncelikle kamu projelerinde BIM'in zorunlu hale getirilmesi, dijital proje teslim süreçlerine yönelik hukuki altyapının oluşturulması ve IoT gibi ileri teknolojilerin inşaat süreçlerine entegre edilmesi, öncelikli hedefler arasında yer almaktadır. Türkiye'de farklı ölçeklerde tamamlanan İstanbul Havalimanı, Ataköy-İkitelli Metro Hattı, spor tesisleri ve şehir hastaneleri gibi projeler, BIM uygulamalarının ulusal düzeydeki örneklerindendir. [80].

Çalıştay bulguları, Türkiye'nin iklim değişikliğiyle mücadelesi ve net sıfır emisyon hedefleriyle ilişkilendirilmiş, BIM'in sürdürülebilirlik alanındaki stratejik rolü özellikle vurgulanmıştır. Ayrıca çalıştayda, BIM teknolojilerinin zaman yönetimi, süreç entegrasyonu, kalite güvence ve afetlere karşı dayanıklılık gibi alanlarda sunduğu avantajlara dikkat çekilmiştir. BIM'in yasal düzenlemelerle desteklenmesi, dijital ruhsatlandırma süreçlerinin oluşturulması ve elektronik proje yönetim sistemlerinin geliştirilmesi yönünde somut öneriler getirilmiştir [80].

3.3.1 BIM Benimsenme Sürecinin Güçlü ve Zayıf Yönleri

Tablo 3.1 ve Tablo 3.2, Türkiye’de BIM uygulamalarının benimsenmesinde karşılaşılan temel zorlukları ve yapısal eksiklikleri ile güçlü yönler ve fırsatları göstermektedir. Değerlendirmeler, BIM’in kurumsal, teknik ve operasyonel düzeyde yaygınlaştırılmasına ilişkin mevcut durumu çok boyutlu olarak irdelemekte ve bulgular tematik başlıklar altında sınıflandırılmaktadır [80].

Tablo 3.1 Paydaş Katılımına İlişkin Güçlü Yön ve Fırsatlar [80]

Güçlü Yön ve Fırsatlar	Açıklama
Uzman ve Mezun Katılımı	BIM çalışmalarına ilgi duyan çok sayıda uzman ve genç mezun bulunmaktadır.
Başarılı Örnek Projeler	Havalimanı projelerinde BIM kullanımı kamuoyunda farkındalık yaratmış ve iyi bir örnek oluşturmuştur.
Gönüllü Kuruluşların Katkısı	buildingSMART ve BIM4Turkey gibi gönüllü platformların varlığı sektöre katkı sunmaktadır.
Popülerleşen Tasarım Yaklaşımları	Enerji verimli ve depreme dayanıklı tasarımlarla yapısal izleme BIM ile desteklenebilmektedir.
Uluslararası Deneyimler	Körfez bölgesi gibi uluslararası projelere katılım sektörteki olgunluğu artırmaktadır.
Kamu Projelerinin Etkisi	Havalimanı, hastane ve Kamu-Özel İş Birliği projeleri BIM’in benimsenmesini teşvik etmektedir.
Kurumsal ve Akademik Destek	Büyük ölçekli kuruluşlar ve akademik çevreler, güncel gelişmelerin takibini kolaylaştırmaktadır.
Öğrenci Yetkinliği	Öğrenciler BIM konusunda başarılıdır ancak beyin göçü sorunu dikkat çekmektedir.

Tablo 3.2 Paydaş Katılımına İlişkin Zayıf Yönler [80]

ZAYIF YÖNLER	SORUN	AÇIKLAMA
Standart ve Strateji Eksikliği	BIM'e Yönelik Ulusal Standartların Belirsizliği	BIM'in tanımı, kapsamı ve uygulanacak süreçler konusunda devlet tarafından belirlenmiş standartlar bulunmamaktadır. Farklı kamu kurumlarının bireysel çabaları olsa da koordineli bir strateji eksiktir. Ortak bir yol haritasına ve zorunlu kılınmış standartlara duyulan ihtiyaç öne çıkmaktadır. BIM devlet tarafından zorunlu hale getirilmelidir.
Sektörel Deneyim ve Kapasite	Yetersiz Sektör Deneyimi	İnşaat sektöründe BIM bilgi ve deneyimi sınırlıdır. Yetkin alt yüklenici, tedarikçi ve insan kaynağı eksikliği yaygınlaşmayı zorlaştırmaktadır. Kamu uygulamaları gelişme aşamasındadır. Hizmet sağlayıcıların azlığı, maliyetleri artırmaktadır.
Kamu Liderliği ve Rehberlik	Kamu Öncülüğünün Zayıf Olması	Belediyeler ve bazı kamu kurumları hâlâ süreçleri basılı belgelerle yürütmektedir. BIM uygulamalarını yönlendiren taraf genellikle özel sektördür. Özel sektörün BIM kullanımında daha ileri seviyededir. Kamu kesiminin liderliği ve rehberliği yetersiz kalmaktadır.
Dijital Güven ve Yasal Çerçeve	Dijital Çıktılara Olan Güven Eksikliği	Kamu sektöründe, BIM hatta CAD çıktıları bile fiziki olarak alınmadığında sürece dahil edilmesinde tereddüt yaşatmaktadır. Düzenleyici yasal çerçevenin eksikliği, sorumlulukların net olmaması ve elektronik imzanın kabul görmemesi gibi sorunlar süreci güçleştiren engellerdendir.
Farkındalık ve Liderlik	Katma Değere Dair Farkındalık Eksikliği	Sektör liderlerinin BIM'in gerekliliği konusundaki görüşleri bölünmüştür. Birçok aktör, BIM'in faydalarının yeterince açık olmadığını düşünmektedir. Mimar ve mühendislerin BIM uygulamalarından doğrudan elde edecekleri faydaların görünür kılınması gerekmektedir.
Zorunluluk ve Eğitim	BIM'in Zorunlu Hale Gelmesinin Tek Başına Yetersizliği	BIM'in zorunlu kılınması önemlidir ancak yeterli değildir. Yaygınlaşma için mülk sahiplerinden öğrencilere kadar farklı düzeyde aktörlere hitap eden kapsamlı eğitim programlarına ihtiyaç vardır.
Kurumsal Uygulama	BIM'in Yalnızca Proje Bazlı Uygulanması	Bazı büyük firmalar BIM'i sadece belirli projelerde kullanmakta, ancak şirket genelinde yapısal bir dönüşüm gerçekleştirmemektedir. Kurumsal BIM metodolojilerine geçiş için strateji ve iyi uygulama örnekleri yaygınlaştırılmalıdır.
İşletmelerin Uyum Sorunu	Yüksek Maliyet ve Erişim Engelleri	Küçük ve orta ölçekli işletmeler için BIM'e geçişte yazılım maliyetleri, eğitim eksikliği ve uluslararası proje erişim sorunları ciddi engellerdir. Bu işletmeler geleneksel yöntemlerle de sürdürülebilir gelir elde ettikleri için dönüşüme isteksiz kalabilmektedir.
Algı ve Kabul Sorunu	BIM'in Maliyetli ve Yavaşlatıcı Algılanması	Yatırımcılar BIM'i maliyetli, zaman alıcı ve gereksiz bir süreç olarak görmektedir. Tasarıma ayrılan sürenin kısalığı, BIM'in entegrasyonuna yeterince zaman tanınmamasına yol açmaktadır.

3.3.2 Türkiye'nin Dijital İnşaat Vizyonu

Bu vizyonu kısa (0-1 yıl), orta (1-3 yıl) ve uzun (3-5 yıl) vadeler için Kamu liderliğinin temeli, iş birliğine dayalı ortak bir çerçeve oluşturma, BIM vizyonunu aktarma ve toplulukları teşvik etme, şirket içi tedarik zinciri kapasitesinin oluşturulması başlıkları altında yapılması gereken eylemler belirtilmiştir. Bu eylemler Güneş Işını grafiği ile gruplandırılmıştır (Şekil 3.6) [80].

İş Birliğine Dayalı Ortak Bir Çerçeve

BIM'e geçişin başarısı, paydaşların ortak katkısına dayanan çok düzeyli bir iş birliği çerçevesinin oluşturulmasına bağlıdır. **Kısa vadede**, pilot projeler uygulanmalı ve bu uygulamalardan elde edilen veriler sistematik olarak ölçülüp analiz edilmelidir. Bu analizler, BIM'in faydalarının somut ve sayısal göstergelerle ortaya konmasını sağlayacaktır. Sürece saha personeli, danışmanlar ve proje ekipleri aktif biçimde katılmalı, IDI gibi destek sağlayıcı kurumlardan teknik ve mali kaynaklar temin edilmelidir. **Orta vadede**, Pilot uygulamalar farklı ölçeklerde yaygınlaştırılmalı, paydaşlar için eğitim ve farkındalık programları geliştirilmeli, kamu ve özel sektörün sürece aktif katılımı teşvik edilmelidir. **Uzun vadede**, BIM'in orta ve büyük ölçekli projelerde %50 oranında kullanımına ulaşılması, eğitimlerin kurumsallaştırılması ve sektörel düzeyde yasal-mevzuat altyapısının tamamlanması hedeflenmelidir [80].

Kamu Liderliğinin Temeli

BIM'in ulusal ölçekte yaygınlaştırılmasında kamu kurumlarının yönlendirici rolü kritik önemdedir. **Kısa vadede**, Kamu kurumları öncülüğünde farkındalık artırılmalı, pilot projeler desteklenmeli ve BIM'in ihalelerde zorunlu hale gelmesi için mevzuat altyapısı oluşturulmalıdır. Veri paylaşımını kolaylaştıracak dijital sistemler geliştirilmelidir. **Orta vadede**, Belediyeler ve meslek birlikleri BIM eğitim sistemine entegre edilmeli, kamu projelerinde teşvik mekanizmaları kurgulanmalı ve e-proje platformları ile ortak veri kullanım altyapısı kurulmalıdır. **Uzun vadede**, BIM eğitimi yükseköğretime yayılmalı, kamu projelerinde BIM zorunluluğu getirilerek ulusal ölçekte sürdürülebilirlik sağlanmalı ve gerekli kamu politikaları ile mevzuatlar tamamlanmalıdır [80].

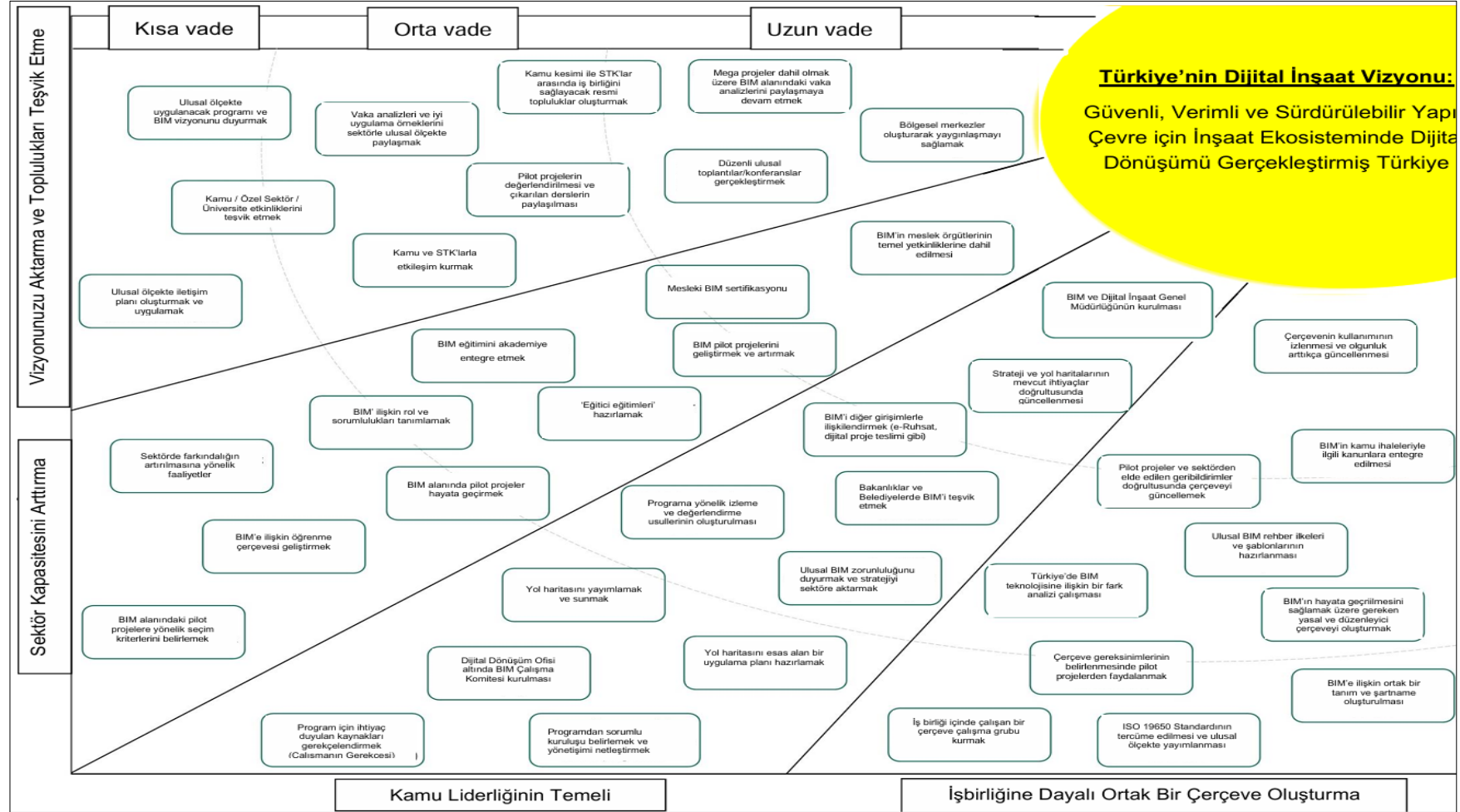
Sektörel Kapasitenin Geliştirilmesi

BIM'in sektörde yaygınlaşması, teknik kapasite artışı ve nitelikli insan kaynağının oluşturulmasıyla doğrudan ilişkilidir. **Kısa vadede**, Yeni mezunlara BIM eğitimi verilerek sektöre entegrasyonları desteklenmelidir. Teknik personelin adaptasyonu için kamu–özel sektör iş birlikleriyle eğitim süreçleri hızlandırılmalı üniversitelerle iş birliği yapılarak sektörel ihtiyaçlara yönelik programlar geliştirilmelidir. **Orta vadede**, İstihdamı artıracak teşvik politikaları hayata geçirilmeli, profesyoneller için sertifikasyon sistemleri kurulmalı ve firmalara yönelik teknik ve mali desteklerle BIM benimsenmesi teşvik edilmelidir. **Uzun vadede**, Çok disiplinli bir BIM enstitüsü kurulmalı, uluslararası akreditasyonlarla lisanslı kurumlarda eğitim yaygınlaştırılmalı ve sektör genelinde uygulamayı destekleyecek büyük ölçekli teşvik mekanizmaları geliştirilmelidir [80].

Vizyon Aktarma ve Toplulukları Teşvik Etme

BIM dönüşüm sürecinin başarılı olabilmesi toplumsal farkındalık ve paydaş katılımının da güçlendirilmesi gerekmektedir. **Kısa vadede**, BIM farkındalığını artırmak için bilgilendirme etkinlikleri düzenlenmelidir. Kamu, özel sektör ve akademi arasındaki iş birliği güçlendirilerek uluslararası örneklerle karşılaştırmalı analizler yapılmalıdır. **Orta vadede**, Başarılı BIM uygulamaları örnek gösterilerek sektör bilgilendirilmeli, kamu–özel iş birlikleriyle uzun vadeli farkındalık programları oluşturulmalı ve topluluklar arası etkileşim desteklenmelidir. **Uzun vadede**, Ulusal düzeyde BIM dönüşüm stratejisi geliştirilmeli, kamu politikalarıyla desteklenmeli, büyük projeler teşvik edilerek sektörde görünürlükleri artırılmalı ve uzun vadeli çok paydaşlı iş birlikleri kurulmalıdır [80].

Şekil 3.6 Türkiye'nin Ulusal BIM Planı İçin Kısa, Orta ve Uzun Vadeli Eylemler [80]



3.3.3 Türkiye’de BIM’e Geçişin Stratejik ve Teknik Altyapısı

Türkiye’de BIM alanında son yıllarda önemli ilerlemeler kaydedilmiş ve ulusal ve uluslararası standartlara dayalı bir dijitalleşme süreci başlatılmıştır. TSE, ISO 19650 standardını Türkçe olarak yayımlamış, böylece bilgi yönetimine ilişkin ulusal düzeyde uyumlu bir çerçeve oluşturmuştur. Bunun yanı sıra ilgili bakanlıklar ve yerel yönetimler, BIM kullanımını teşvik eden teknik şartnameler ve sektöre yönelik kılavuzlar hazırlamıştır [80].

BIM’in gerekliliği artık genel kabul görmektedir ancak Türkiye gibi büyük ve farklı dinamiklere sahip bir ülkede geçişin aşamalı, planlı ve yerel ihtiyaçlara duyarlı biçimde yönetilmesi kritik önemdedir. Sektörel alışkanlıklar, bölgesel farklılıklar ve değişime direnç, sürecin önündeki temel engeller arasında yer almaktadır. Bu nedenle tüm kamu kurumları, belediyeler ve özel sektör paydaşları ortak bir strateji geliştirmeli, kapsayıcı modeller ve pilot uygulamalarla ilerlemelidir [80].

Geçiş sürecinde uluslararası deneyimlerden olduğu kadar yerli yazılım ve çözümlerden de yararlanılması, maliyetlerin azaltılması ve adaptasyonun kolaylaşması açısından önemlidir. BIM’in sadece yazılım değil, veri yönetimi ve iş kültürünü kapsayan bütünsel bir dönüşüm olarak görülmesi gerekmektedir. Merkezi veri havuzları, standart süreçler ve eğitimler bu dönüşümün yapı taşlarını oluşturmalıdır [80].

Doğru kurgulanmış bir BIM altyapısı ile hata oranı düşürülüp süreç verimliliği artırılabilirken, Türkiye’nin küresel inşaat sektöründeki rekabet gücü de güçlenecektir. Bakanlık tarafından yapılan açıklamalarda, BIM’in yaygınlaşmasına yönelik teknik ve kurumsal desteğin sürdürüleceği ve bu sürecin öncelikli bir kamu politikası olarak ele alındığı ifade edilmiştir [80].

BIM’in teknik altyapısında önemli bir yeri olan IFC veri şeması, TSE tarafından ISO 16739 standardı çerçevesinde kabul edilmiştir. Yazılım bağımsızlığı sağlayan IFC formatı, tıpkı PDF’in belgeler için sunduğu standartlaşma gibi BIM verilerinin paylaşımı ve uzun vadeli arşivlenmesi açısından kritik bir role sahiptir.

Özellikle çok paydaşlı projelerde farklı yazılımlarla oluşturulan modellerin ortak bir veri formatında birleştirilmesi, disiplinler arası uyumu kolaylaştırmaktadır [80].

Projelerin teslim şartnamelerinin uluslararası standartlara uygun olduğunda, projelerde üretilen verilerin doğruluğu otomatik sistemler tarafından kolayca denetlenebilir hale gelir. Binlerce yapı elemanının manuel olarak kontrol edilmesi yerine, bu süreçler artık otomasyonla yönetilmekte ve olası hatalar erken aşamada tespit edilebilmektedir. Böylelikle BIM, sürdürülebilir, paylaşılabilir ve doğrulanabilir bir dijital yönetim sistemine dönüşmektedir [80].

Son yıllarda, “veri sözlükleri” kavramı öne çıkmış yapı elemanlarının hangi özelliklerle tanımlanması gerektiği belirlenmiştir. Örneğin Dubai Belediyesi’nin bina ruhsat süreçlerinde kullanılan sistem, her model elemanının sahip olması gereken parametreleri açıkça tanımlayarak şeffaf ve izlenebilir bir süreç oluşturmuştur. Türkiye’de de benzer yapıların oluşturulması, model doğruluğunu artırmakta ve proje teslimatlarını standartlaştırmaktadır [80].

Öte yandan BIM, yalnızca bina ölçeğinde değil; mahalle, kampüs, kent ve bölgesel düzeyde de etkili bir araç haline gelmiştir. Akıllı şehir uygulamalarının sürdürülebilir biçimde hayata geçirilebilmesi, bina ölçeğinde üretilen verilerin şehir genelinde ortak bir yapıya entegre edilmesiyle mümkündür. Bu noktada BIM, şehirlerin dijital ikizlerini daha gerçekçi, dinamik ve yönetilebilir bir şekilde oluşturmak için önemli bir altyapı sunar [80].

CBS ile entegre kullanılan BIM teknolojileri sayesinde, havaalanı, üniversite yerleşkesi, hastane kompleksi gibi geniş ölçekli projelerde verilerin eş zamanlı yönetimi mümkün hâle gelir. Akıllı şehir altyapılarının işlevsel olabilmesi, yapıların sahip olduğu fiziksel ve işletmeye yönelik verilerin şehir bilgi sistemlerine doğrudan aktarılmasına bağlıdır. Çoğunlukla geometrik temsil sunan CityGML modelleri bu ihtiyacı karşılamakta yetersiz kalırken; enerji tüketimi, bakım süreçleri, kullanıcı hareketleri ve yaşam döngüsü verilerini barındıran BIM tabanlı veri yapılarının önemi giderek artmaktadır [80].

Bu entegrasyonlar, akıllı şehir uygulamalarının temelini oluşturmakta ve yapı verilerinin çevresel, mekânsal ve yönetsel boyutlarla birlikte değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Sonuç olarak dijital ikizler, yapay zekâ destekli analizler ve akıllı bina sistemleri gibi yeni nesil teknolojilere geçişte BIM, verinin kalitesini koruyan ve süreçleri standartlaştıran temel bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Türkiye’de BIM’in sağladığı verimlilik, doğruluk ve sürdürülebilirlik avantajlarının tüm sektöre yayılması, dijitalleşme vizyonunun gerçekleşmesinde belirleyici olacaktır [80].

3.3.4 BIM’e Geçiş Süreci ve Karşılaşılan Zorluklar

Türkiye’de BIM sistemine geçişin ülke gerçeklerine uygun şekilde, kademeli ve planlı olarak yürütülmesi büyük önem taşımaktadır. İnşaat sektörünün ekonomideki ağırlığı, dönüşüm sürecinde dikkatli adımlar atılmasını zorunlu kılmaktadır. Aksi hâlde, aceleci yaklaşımlar sistemi benimsemeyi zorlaştırabilir [80].

BIM, teknolojik olduğu kadar kültürel de bir dönüşüm sürecidir. Sistemin yaygınlaşmasındaki temel engellerden biri, sektörün değişime karşı dirençli yapısıdır. Farklı bölgelerdeki uygulama koşulları dikkate alınarak, kapsayıcı ve yerel farklılıkları gözetken bir model geliştirilmelidir. Bu noktada tüm kamu kurumları ve projeciler ortak bir anlayışla hareket etmeli ve pilot uygulamalarla sürecin sorunlu alanları tespit edilmelidir [80].

Yurtdışındaki iyi uygulama örneklerinden, özellikle Birleşik Krallık’tan öğrenilecek çok şey vardır. Ancak yazılım altyapısı, eğitim ve yaygınlaştırma çalışmaları ciddi teknik ve mali kaynak gerektirir. Yerli yazılımların geliştirilmesi ve desteklenmesiyle maliyetleri azaltacak ve adaptasyonu kolaylaştıracaktır [80].

BIM kullanımı hataları azaltma, kaynakları verimli kullanma ve proje sürelerini kısaltma gibi önemli kazanımlar sunar. Yalnızca proje tasarımı değil tüm yaşam döngüsünü kapsayacak şekilde kullanılması sağlanarak veri yönetiminin standardize edilmesi ve erişilebilir ortak veri havuzlarının oluşturulması gereklidir. Bu çalışmalar, Türkiye’nin uluslararası pazarda rekabet gücünü de artıracaktır. Sürecin başarısı için sektör temsilcileriyle düzenli istişareler yapılmalı, deneyim paylaşımı sağlanmalı ve merkezi düzeyde koordinasyon sürdürülmelidir [80].

BÖLÜM 4

KÜRESEL ÇAPTA BIM POLİTİKA VE UYGULAMALARININ İNCELENMESİ

Son yıllarda dünya genelinde inşaat sektörünün dijitalleşme süreci hız kazanmış ve birçok ülke BIM teknolojilerini ulusal düzeyde stratejik bir araç olarak benimsemeye başlamıştır. BIM teknolojilerine yönelik küresel talep artan inşaat faaliyetleri, gelişmiş iş birliği gereklilikleri, dijitalleşme odaklı politikalar ve kamu destekli teşviklerle hızla artmaktadır. 2024 yılında Markets and Markets tarafından yayımlanan sektörel analiz raporuna göre küresel BIM pazarının, 2029 yılına kadar önemli ölçüde büyümesi beklenmektedir. Yazılım ve hizmetler, dağıtım türü, kullanım alanları ve bölgesel dağılım başlıkları altında incelenen küresel BIM pazarının, 2024 yılında 8 milyar dolar seviyelerinde olduğu tahmin edilmektedir. 2029 yılı itibarıyla ise 14,8 milyar dolara ulaşarak yıllık ortalama %13,1 oranında büyüme göstereceği öngörülmektedir [81].

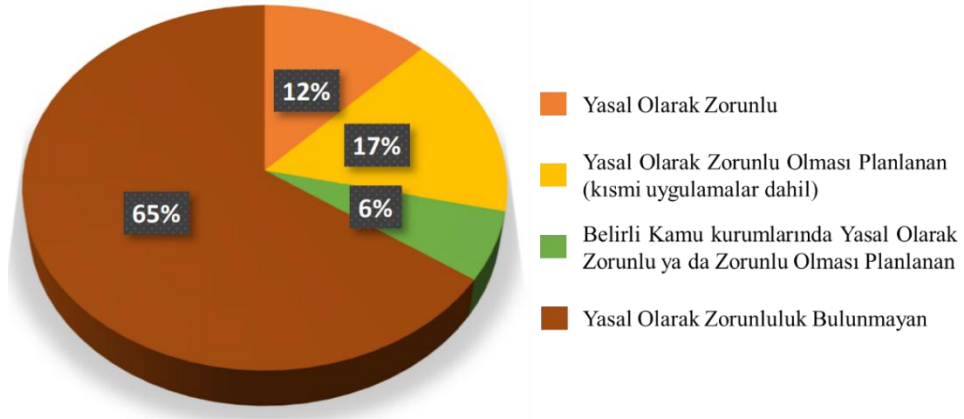
Bu bölümde, BIM teknolojilerini benimseyen ülkelerin stratejik yaklaşımları ve uygulama modelleri ele alınacaktır. Birleşik Krallık, Singapur, Almanya, Fransa, Güney Kore, Amerika Birleşik Devletleri, Finlandiya gibi ülkelerde uygulamaya konulan BIM stratejileri, yasal düzenlemeler, kamu projelerinde BIM kullanımı ve dijital platformlar aracılığıyla yürütülen uygulamalar detaylı olarak incelenecektir. İnceleme kapsamında, söz konusu ülkelerdeki BIM politika ve uygulamalarının genel durumunun daha iyi anlaşılması hedeflenmektedir.

4.1 Avrupa Kıtası

Avrupa genelinde BIM uygulamaları ülkeden ülkeye farklılık göstermekte, bu farklılık genellikle ulusal stratejiler, dijital dönüşüm planları ve sektörel ihtiyaçlara göre şekillenmektedir. Almanya, Birleşik Krallık ve Norveç gibi ülkeler erken dönemde yayınladıkları yol haritalarıyla BIM'i kamu projelerinde aşamalı olarak zorunlu hale getirmiştir. Buna karşılık Polonya, Romanya, Litvanya ve Letonya gibi ülkeler BIM'i ilerleyen yıllarda belirli proje türleri için zorunlu kılmayı planlamaktadır. Hollanda, Portekiz, Lüksemburg ve Yunanistan'da ise BIM yasal bir zorunluluk olmasa da kamu projelerinde yaygın olarak kullanılmakta ve dijital

dönüşüm stratejileri çerçevesinde teşvik edilmektedir. İrlanda ve Slovenya gibi ülkelerde BIM'in akıllı şehir uygulamaları ve dijital kamu altyapıları ile entegrasyonu öne çıkmaktadır.

Şekil 4.1 BIM'in Avrupa'da Zorunluluk Oranını Gösteren Grafik [82]



2024 yılında yapılan 49 Avrupa ülkesini kapsayan bir analiz çalışması, ülkelerin BIM'e yönelik yasal zorunluluk durumunu ortaya koymuştur (Şekil 4.1). Grafik incelendiğinde, Avrupa ülkelerinin yaklaşık %35'inde BIM zorunluluğunun bulunduğu veya yakın gelecekte zorunlu hale getirilmesinin planlandığı görülmektedir. Ülkelerin %12'sinde ulusal düzeyde BIM zorunluluğu bulunmakta, %17'si bu doğrultuda planlamalar yapmakta ve %6'sında ise sadece belirli kamu kurumlarında zorunluluk uygulanmaktadır. Buna karşılık ülkelerin %65'inde kamu yatırımlarında BIM kullanımına yönelik herhangi bir yasal zorunluluk bulunmamaktadır [82].

Avrupa düzeyinde Dijital Ürün Pasaportu girişimi kapsamında hazırlanan bir raporda, Avrupa Parlamentosu'nun ilan ettiği iklim acil durumu ve Avrupa Yeşil Mutabakatı hedefleri doğrultusunda BIM teknolojilerinin sürdürülebilirlik politikalarıyla entegre edilmesi önerilmektedir. Bu bağlamda BIM dijitalleşme aracı ve çevresel hedeflerin gerçekleştirilmesinde stratejik bir unsur olarak değerlendirilmektedir [83].

BIM kullanımı Avrupa ülkelerinin çoğunda yasal bir zorunluluk haline gelmemiş olsa da birçok Avrupa ülkesinde BIM'in yaygınlaşması amacıyla ulusal

platformlar kurulmakta, pilot projeler yürütülmekte ve rehber dokümanlar hazırlanmaktadır. Tüm bu gelişmeler Avrupa’da BIM’in teknik altyapıdan, kurumsal yapılara ve yasal düzenlemelere kadar birçok alanda kapsamlı bir dönüşüm süreci yaşadığını göstermektedir [84].

4.1.1 Birleşik Krallık

Birleşik Krallık, dijital inşaat teknolojilerinin benimsenmesi konusunda dünya genelinde öncü ülkelerden biridir. Sürecin başlangıç noktalarından biri 2010 yılında İngiliz Standartlar Enstitüsü (BSI) tarafından yayımlanan BS 1192 standardıdır. BS 1192 standardı, dijital iş akışlarının temellerini belirleyen ve proje bilgi yönetimi konusunda sektöre yön veren ilk teknik çerçeveyi oluşturmuştur. Ardından geliştirilen “PAS 1192” serisi ile BIM süreçlerine dair teknik detaylar, proje yönetimi yaklaşımları ve iş birliği protokolleri standartlaştırılmıştır. Öncelikle ulusal düzeyde ve sektör temelli uygulamalara yönelik hazırlanan bu belgeler, zaman içinde uluslararası standardizasyon çabalarına da önemli katkılar sağlamıştır [82].

2011 yılında hükümetin tüm kamu projelerinde BIM kullanımını zorunlu hale getirmesi, dijital dönüşüm sürecinin en kritik kırılma noktalarından biri olmuştur. Aynı yıl inşaat baş danışmanı Paul Morrell’in BIM’in benimsenmesine yönelik çağrısı, kamu ve özel sektörde geniş yankı uyandırmış, dijitalleşmeye dair farkındalığın artmasına katkı sağlamıştır. Morrell’in “ya BIM’i benimseyin ya da Betamax¹⁰ gibi tarih olun” uyarısı, sektörde dönüşümün hız kazanmasında etkili olmuştur [85]. Haziran 2011’de yayımlanan Hükümet BIM Stratejisi, 2016 yılına kadar tüm kamu projelerinde iş birliğine dayalı 3B BIM kullanımını hedeflemiş ve bu doğrultuda COBie veri formatı ile uyumlu teslim süreçlerini tanımlamıştır. 2016 yılına gelindiğinde İngiltere hükümeti tarafından tüm kamu sektörü projeleri için BIM Seviye 2 zorunlu hale getirilmiştir [82].

Birleşik Krallık bu süreçte teknik standartlar üretirken, sektörel koordinasyonu sağlamak amacıyla çeşitli kurumsal yapılar da oluşturmuştur. Hükümetin dijitalleşme

¹⁰ **Betamax**, 1970’lerde geliştirilen fakat VHS karşısında başarısız olarak tarihe karışan bir video kaset formatıdır. Morrell’in sözünde, BIM’i benimsemeyenlerin aynı akıbeti uğrayacağına gönderme yapılmıştır.

stratejisinin yürütülmesinden sorumlu olan BIM Görev Grubu sürecim ilk yıllarında önemli bir rol üstlenmiş ve 2016 yılında görev, Cambridge Üniversitesi bünyesinde faaliyet gösteren Dijital Yapılı Britanya Merkezi (*Centre for Digital Built Britain, CDBB*) tarafından devralınmıştır. CDBB ülkede BIM uygulamalarını, dijital ikiz çalışmalarını ve yapı çevrenin dijital dönüşümünü yönlendirmek üzere kurulmuştur. [82,86]. Aynı dönemde özel sektör ve meslek kuruluşları arasındaki iş birliğini güçlendirmek amacıyla kurulan UK BIM Alliance, dijital dönüşüm sürecine aktif katkı sağlamaya devam etmiştir. UK BIM Alliance organizasyonu 2017 yılında BuildingSMART UK & Ireland ile birleşerek küresel ölçekte standardizasyon çalışmalarına da destek vermiştir [87].

2019 yılında CDBB, UK BIM Alliance ve BSI Group iş birliğiyle başlatılan UK BIM Framework, önceki BIM Seviye 2 sistematığını geride bırakıp ISO 19650 standardına dayanan daha kapsamlı ve uluslararası uyumlu bir yapı sunmuştur. Bu yeni yapı bilgi yönetiminin proje yaşam döngüsünün tüm aşamalarında sürdürülebilir şekilde yürütülmesini hedeflemektedir. Aynı zamanda Birleşik Krallık'ın ulusal sınıflandırma sistemi olan Uniclass 2015, ISO 12006-2 standardına uyumlu olarak yeniden yapılandırılmış ve National Building Specification (NBS) tarafından sektöre kazandırılmıştır. Uniclass 2015 mimari, mühendislik, altyapı ve peyzaj gibi farklı disiplinleri kapsayan ve BIM süreçleriyle tam entegre çalışan bir veri sınıflandırma sistemi olarak kabul görmüştür [88].

“Birleşik Krallık'ın Altyapı Performansının Dönüşümü: 2030'a Giden Yol Haritası” belgesinde BIM teknolojilerinin daha hızlı ve yaygın şekilde uygulanması temel önceliklerden biri olarak tanımlanmıştır. Beşinci nesil iletişim ağları ve yapay zekâ ile desteklenen BIM, sensör sistemlerinden robotik uygulamalara ve artırılmış gerçekliğe kadar birçok dijital çözümün entegrasyonunu kolaylaştırarak verimliliği ciddi ölçüde artıracaktır. 2030 yılına kadar dijital teknolojilerin varsayılan yöntem hâline gelmesi ve müşterilerle tedarikçilerin daha verimli, etkili ve kaliteli altyapı teslimi için birlikte çalışması hedeflenmektedir [89].

Birleşik Krallık'ta BIM teknolojisi, Marischal Square, 22 Bishopsgate ve The Victoria Gate Shopping Centre gibi çok sayıda büyük projede başarıyla uygulanmış, dijital inşaat süreçlerine geçişte önemli bir rol üstlenmiştir. Bu örneklerden biri olan

Thames Tideway Tüneli, Birleşik Krallık'ın en büyük ve en eski su altyapı projelerinden biridir ve Londra'da artan talep ve sınırlı kapasite nedeniyle yeniden tasarlanmıştır (Şekil 4.2). Projede BIM teknolojisinin kullanılması sayesinde, mimarlar detaylı tasarım aşamasına kadar geleneksel çizim süreçlerine ihtiyaç duymadan çalışabilmiştir. Ayrıca BIM kritik değerlendirme gereken alanların belirlenmesine yardımcı olmuş, tasarım doğruluğunu artırarak güvenliğin sağlanmasında önemli rol oynamıştır [90].

Şekil 4.2 Tasarımında BIM Kullanılan Thames Tideway Tüneli [90]



Akademik alanda BIM eğitimi ve araştırmaları Birleşik Krallık'taki üniversitelerde yürütülmeye devam etse de eğitim programlarının yaygınlığı ABD'ye kıyasla daha sınırlı düzeydedir [81]. Diğer yandan NBS tarafından yapılan araştırmalar, 2011 yılında %57 olan BIM farkındalığının 2020 yılı itibarıyla %73 oranında aktif kullanıma dönüştüğünü ortaya koymaktadır [91]. İncelenen çalışmalar BIM'in sektörde giderek daha fazla benimsendiğini ve Birleşik Krallık'ın dijitalleşme sürecini istikrarlı ve kararlı adımlarla sürdürdüğünü göstermektedir.

Birleşik Krallık, BIM alanındaki stratejik yaklaşımıyla yalnızca kendi inşaat sektöründe dijitalleşmeyi desteklemekle kalmamış, aynı zamanda uluslararası standartların oluşumuna da öncülük etmiştir. ISO 19650 standardına temel oluşturan birçok uygulama, bu ülkedeki deneyimlere dayanmaktadır. Kurumsal politikaları ve

örnek projeleri sayesinde Birleşik Krallık, dijital inşaat uygulamalarında küresel ölçekte etkili bir aktör konumuna gelmiştir [82].

4.1.2 Avusturya

Avusturya'da BIM uygulamaları henüz yasal bir zorunluluk haline gelmemiştir ancak dijital dönüşüm sürecinin belirli bileşenlerinde BIM'in önemi giderek artmaktadır. Ülkedeki inşaat sektörünün büyük ölçüde küçük ve orta ölçekli işletmeler tarafından şekillendirilmesi BIM'in yaygınlaşmasını sınırlayan temel faktörlerden biridir. Bu nedenle maliyeti yüksek dijital çözümler genellikle büyük ölçekli projelerde kullanılabilir [92]. Dijitalleşme yönündeki ilk sistematik adımlardan biri 2014 yılında Viyana Belediyesi tarafından başlatılmıştır. “Viyana Dijital Gündemi” (*Die Digitale Agenda Wien*) adıyla hayata geçirilen bu girişim, inşaat sektöründeki idari işlemlerin dijital ortama aktarılmasını amaçlamaktadır [93].

2021 yılında federal hükümet tarafından açıklanan "Yapay Zekâ Misyonu Avusturya 2030" stratejisi kentlerin sürdürülebilir dönüşümünü hedefleyen FTI–City of Future programı aracılığıyla planlama, inşaat ve bina operasyon süreçlerine dijital teknolojilerin entegre edilmesini ön plana çıkarmıştır. BIM'in söz konusu dönüşüm süreçlerinde stratejik bir rol oynayacağı ifade edilmiştir [94].

Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan 2021 ülke profili raporuna göre Avusturya'da 2018 yılından itibaren kamu projelerinde bütçe kontrolü amacıyla BIM kullanılmaya başlanmış, 2020 itibarıyla ise kamu inşaat ihaleleri ve sözleşmelerinde BIM kullanımının önerildiği belirtilmiştir. Ancak bu uygulamaları destekleyen bağlayıcı bir yasal çerçevenin bulunmaması ülkedeki BIM stratejilerinin henüz kurumsal olgunluk düzeyine ulaşmadığını göstermektedir [95].

Avusturya'da yasal çerçevenin tam oluşmamış olmasına rağmen dijital altyapı projelerine yönelik yürütülen araştırma ve geliştirme faaliyetleri dikkat çekici bir gelişim göstermiştir. Avusturya Araştırma Teşvik Ajansı (FFG), 2020–2022 döneminde yürütülen BIM4AMS programıyla ulaştırma altyapısında BIM tabanlı model kullanımını incelemiştir. Ayrıca FFG, karayolu sistemlerine yönelik dijital ikiz çözümleri üzerine odaklanan DIGEST (2020–2022), köprü altyapılarında gerçek trafik

yüklerini temel alan REAL-LAST (2021–2024) ve dijital ikiz teknolojilerini kapsamlı biçimde kullanan DiTwin (2023–2026) gibi projeleri finanse etmiştir [82].

4.1.3 Almanya

Almanya'da BIM süreçleri, 2015 yılında Ulaştırma ve Dijital Altyapı Bakanlığı tarafından yayımlanan “BIM Yol Haritası (*Stufenplan Digitales Planen und Bauen*)” ile sistematik bir yapıya sahip olmuştur [96]. Yol haritası, 2020 itibarıyla tüm federal ulaştırma altyapı projelerinde BIM kullanımını zorunlu hale getirmeyi hedeflemiş ve süreç 2015–2017 arasında hazırlık, 2017–2020 arasında pilot uygulama ve 2020 sonrası performans olmak üzere üç aşamada yapılandırılmıştır [97]. Aynı yıl Büyük Projelerin Yapımına İlişkin Reform Komisyonu da BIM kullanımını teşvik eden öneriler sunmuş ve inşaat sektörünün dijital dönüşümüne destek vermiştir. Ayrıca Almanya'nın önde gelen altyapı yatırımcılarından Deutsche Bahn, ayrıntılı BIM kılavuzları yayımlayarak uygulamaların yaygınlaşmasında önemli bir rol üstlenmiştir [98].

BIM uygulamaları federal düzeyde iki ayrı bakanlık tarafından yönetilmektedir: Altyapı projeleri Federal Dijital İşler ve Ulaştırma Bakanlığı, bina inşaat projeleri ise Federal Konut, Kentsel Gelişim ve İnşaat Bakanlığı sorumluluğundadır. Farklı sektörler için ayrı strateji belgeleri hazırlanmıştır. Örneğin 2022 yılında yayımlanan su yolları projelerine özel BIM stratejisinde BIM'in 2020, 2025 ve 2030 yıllarına karşılık gelen üç aşamalı bir planla uygulanması öngörülmüştür [82,98]. Benzer şekilde demiryolu sektörü için geliştirilen strateji belgesinde, BIM'in hâlihazırda yeni altyapı projelerinde kullanıldığı belirtilmiş, 2025'e kadar planlama ve yapım süreçlerinde yaygınlaştırılması, sonrasında ise işletme süreçlerine entegre edilmesi hedeflenmiştir. Bu plan da üç aşamada kurgulanmıştır: 2015–2020 hazırlık, 2020–2025 geçiş, 2025 sonrası ise BIM'in "yeni bir yöntem" değil, "yeni bir norm" olarak kabul edileceği ifade edilmiştir [99].

Federal binalara ilişkin BIM stratejisi ise 2021 yılında yayımlanmıştır. Buna göre 2020'den itibaren planlama ve tasarım süreçlerini kapsayan birinci seviye, 2023'ten itibaren 50 milyon Euro üzerindeki büyük projeler için ikinci seviye, 2025'ten itibaren ise 0,5 milyon Euro'yu aşan projeler için üçüncü seviye BIM

uygulamaları öngörülmüştür. 2027 itibarıyla ise bu uygulamaların dış onay mekanizmaları ve lojistik planlama ile birlikte yürütülmesi planlanmaktadır. Söz konusu strateji, daha sonra geliştirilecek ayrıntılı bir BIM el kitabının temelini oluşturacak şekilde yapılandırılmıştır [100].

Genel olarak Almanya'da BIM stratejileri altyapı projelerinde zorunlu kullanım üzerinden şekillenmiş olup bu yaklaşım Avrupa ülkeleriyle karşılaştırıldığında orta düzeyde bir ilerlemeyi temsil etmektedir [82]. Gerçekleşen sektörel iş birlikleri, çok aşamalı eylem planları ve kapsamlı kurumsal yapılar Almanya'nın uzun vadeli dijital inşaat hedeflerine ulaşmak için güçlü ve planlı bir zemin oluşturduğunu göstermektedir.

4.1.4 İspanya

İspanya'da BIM kullanımı son yıllarda yasal zorunluluk haline gelmiş olmasına rağmen 2009 yılından itibaren kamu kurumları ve idareler tarafından BIM uygulamalarına yönelik ilk girişimler gerçekleşmiştir. 2012 yılında, BIM'in yaygınlaşmasını ve standartlaşmasını desteklemek amacıyla buildingSMART Spain adlı kuruluşlar topluluğu kurulmuştur. 2014 yılında BuildingSMART Spain, İspanyolca yayımlanan ilk BIM kılavuzları olan UBIM dokümanlarını hazırlamıştır. 2015 yılında ise esBIM İspanya Komisyonu, Altyapı Bakanlığı'na bir BIM yol haritası sunmuştur. Avrupa Birliği'nin 2014/24/UE sayılı direktifine uyum kapsamında İspanya 2016 yılından itibaren AB kamu fonlarıyla finanse edilen projelerde BIM kullanımını teşvik etmektedir. 2018 yılı itibarıyla ise maliyeti 2 milyon Euro üzerindeki kamu altyapı projelerinde tasarım ve inşaat aşamalarında BIM kullanımı zorunlu hale getirilmiştir. 2020 yılına kadar havaalanları, tren istasyonları, limanlar ve diğer büyük ölçekli projelerde BIM kullanımının analiz edildiği planlar yürütülmüştür [101].

İspanya'nın Katalonya bölgesinde ise 2015 yılından bu yana kamu ve özel sektör temsilcilerinden oluşan "Geleceği İnşa Et Komisyonu" iş birliğine dayalı BIM uygulamalarını desteklemek amacıyla faaliyet göstermektedir. Komisyon, 2017 yılında ise inşaat sürecinin tüm aşamalarında IFC standartlarının kullanılmasını benimsemiştir [102, 103]. Katalonya Hükümeti 2018 yılında belirli büyüklükteki

projelerde BIM kullanımını zorunlu hale getirmiş, bu eşik 2023 yılında 2 milyon Euro'ya düşürülerek kapsam genişletilmiştir [104]. İspanya'da BIM'in kamu bina ihalelerinde zorunlu kullanımı 2018 yılından itibaren uygulanmaya başlanmıştır. 2021 yılında BIM uygulamaları için bir kılavuz yayımlanmış ve 2023 yılında ise kamu alımlarında BIM kullanımını kademeli olarak yaygınlaştırmayı hedefleyen resmi PLANBIM programı yürürlüğe girmiştir. PLANBIM programı, 2024 yılında başlayıp 2030 yılına kadar sürece şekilde dört aşamalı olarak planlamıştır [105].

4.1.5 Fransa

Fransa'da BIM uygulamalarına yönelik ilk örneklerden biri 2004 yılında Burgundy bölgesinde çoğunluğu eğitim kurumlarından oluşan 135 binanın yönetim süreçlerinde BIM'in kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır [106]. Ülke genelinde ise inşaat sektörünün dijitalleşme sürecini desteklemek amacıyla 2014 yılında "*Plan de Transition Numérique du Bâtiment (PTNB)*" adlı ulusal dijital dönüşüm programını başlatılmıştır [107]. Program kapsamında, dijital yöntemlerin benimsenmesi hedeflenmiş ve gönüllülük esasına dayalı bir BIM yaklaşımı benimsenmiştir. PTNB kapsamında 2015 yılında BIM yol haritası, 2016 yılında bina sahiplerine yönelik bir BIM kılavuzu ve 2017 yılında da standardizasyon stratejisi yayımlanmıştır [108-110]. 2016 tarihli bir kararnameyle, 2014/24/AB sayılı Avrupa Birliği direktifinin uygulanması kapsamında kamu ihalelerinde BIM kullanımının zorunlu tutulabileceği hükme bağlamıştır ancak takip eden yıllarda BIM genel olarak kadar inşaat sektöründe büyük ölçüde kullanılmamıştır [111].

Fransa'da BIM'e yönelik yaklaşımlar genel olarak teşvik ve rehberlik odaklıdır. Bununla birlikte 2017 itibarıyla Fransız hükümeti, dijital araçlarla 500.000 konut inşa etmeyi hedefleyen ve 20 milyon avroluk bütçe ayırdığı bir kalkınma planını duyurarak BIM kullanımını teşvik edici yönde adımlar atmıştır [112].

2019 yılında, Bölgesel Uyum ve Yerel Yönetimlerle İlişkiler Bakanlığı tarafından "Plan BIM 2022" girişimi başlatılmış ve bu kapsamda dijital dönüşüm sürecini hızlandırmak amacıyla 10 milyon avroluk bir kamu kaynağı tahsis edilmiştir [113]. Aynı yıl içerisinde bilgi alışverişi süreçlerini iyileştirmeye ve bina yaşam döngüsü boyunca güvenilir veri yönetimini sağlamaya yönelik resmi bir ulusal

standardizasyon yol haritası yayımlanmıştır [112]. Ayrıca PTNB programının süresi 2024 yılına kadar uzatılarak BIM'in sektöre entegrasyonunun teşvik edilmesi hedeflenmiştir. Hedefler doğrultusunda BIM uygulamaları, özellikle büyük ölçekli projelerde yaygınlaşmaya başlamıştır. 2020 yılında yayımlanan bir rapora göre Fransa'daki gayrimenkul geliştiricilerinin %35'i BIM kullanmaya başlamış, inşaat firmalarının %50–60'ı BIM teknolojisiyle çalışmaya yönelmiştir [91].

2022 yılının başlarına gelindiğinde PLAN BIM 2022 ve PTNB programlarının devamı niteliğinde PLAN BIM programı yürürlüğe girmiştir. PLAN BIM, diğer programlar gibi inşaatta dijital teknoloji kullanımını yaygınlaştırmayı ve profesyoneller arasında beceri gelişimini teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Program kapsamında, proje yaşam döngüsünün tüm aşamalarında BIM'in sistematik şekilde kullanılması, ortak veri ortamı prensiplerinin yaygınlaştırılması ve yerel yönetimlerin dijital kapasitesinin artırılması hedeflenmiştir [114].

4.1.6 Hollanda

Hollanda'da BIM'in kullanımı yasal bir zorunluluğa dayanmasa da kamu ve özel sektör projelerinde işveren talepleri doğrultusunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Devlet Demiryolu Kurumu (*ProRail*), Bayındırlık ve Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (*Rijkswaterstaat*) ve Merkezi Hükümet Emlak Ajansı (*Rijksvastgoedbedrijf*) gibi kurumlar, altyapı ve inşaat projelerinde düzenli olarak BIM uygulamalarını kullanmaktadır [115]. BIM'i destekleyen açık veri protokollerine dayalı paylaşım altyapıları geliştirilmiş ve dijital iş birliğini güçlendirmeye yönelik önemli adımlar atılmıştır [116]. 2012–2014 yılları arasında Altyapı ve Çevre Bakanlığı tarafından yürütülen ve 12 milyon Euro bütçeye sahip BIM Geliştirme Programı dikkat çekmektedir. 2014 yılında Twente Üniversitesi öncülüğünde başlatılan bir akademik araştırma projesiyle BIM kullanan kurumların dijital olgunluk seviyeleri analiz edilmiştir [117].

Hollanda'da Rotterdam Belediyesi katkılarıyla gerçekleştirilen GeoBIM projesi, CBS–BIM entegrasyonuna yönelik önemli bir çalışmadır. 2017–2018 döneminde başlatılan projede BIM verilerini analiz edebilen bir yazılım aracı geliştirilmiş, daha sonra bu araç web tabanlı bir platforma dönüştürülerek IFC

modellerinin görselleştirilmesi ve CBS verileriyle birlikte kullanılması sağlanmıştır. IFC modelleri, parsel bilgileri, yol verileri ve yükseklik noktaları gibi veri setleri kullanılan proje sayesinde, binaların ve altyapının dijital temsilleri Tapu ve Kadastro Kurumu (*Kadaster*) verileriyle entegre edilebilmiştir [118].

4.1.7 İtalya

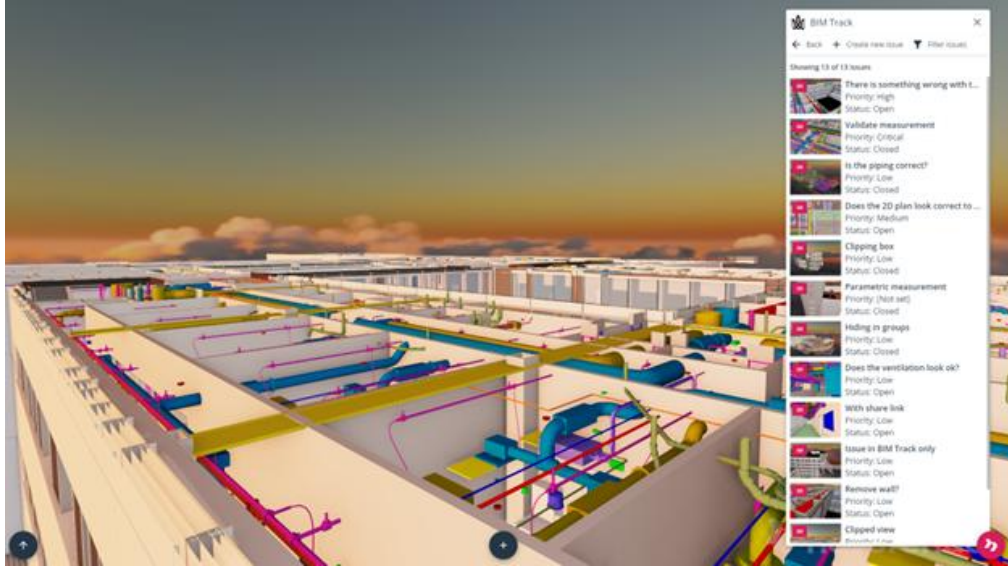
İtalya’da BIM uygulamaları genel olarak erken gelişim aşamasında görülmekle birlikte, son yıllarda bu alandaki yasal düzenlemeler hız kazanmıştır. Altyapı Bakanlığı tarafından yayımlanan plan doğrultusunda 2019’dan itibaren maliyeti 100 milyon avronun üzerindeki büyük ölçekli kamu projelerinde BIM kullanımı zorunlu hale getirilmiştir. Polis, itfaiye, hastane gibi kamu yapıları ile yüksek kullanım yoğunluğuna sahip özel güvenlik standartlarına tabi binalarda BIM uygulaması zorunlu tutulmuştur. 2022 itibarıyla ise yüksek güvenlik gerektirmeyen projeler dışında tüm kamu projelerinde BIM kullanımı mecburî hale gelmiştir [119, 120]. İtalya’da, ulusal ölçekte BIM süreçlerinin standartlaştırılması ve sektörel entegrasyonun sağlanması amacıyla UNI 1137 standardı geliştirilmiştir. UNI 1137 standardı, BIM uygulamalarında dijital bilgi akışının etkin ve uyumlu şekilde yönetilmesi için rehber ilkeler ve kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır.

4.1.8 Norveç

Norveç, kamu projelerinde BIM kullanımını zorunlu hale getiren ilk ülkelerden biridir. 2000’li yıllarda pilot projelerle başlayan süreç, 2010’lu yıllarda BIM standartlarının oluşturularak kamu projelerinde uygulanması ve BIM’in aşamalı şekilde zorunlu hale getirilmesi ile devam etmiştir. 2020’li yıllarda ise BIM, kamu projeleri ile beraber özel sektör inşaat faaliyetlerinde de benimsenmiş ve altyapı, bina ve ulaşım projelerinde ülkede geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Norveç hükümetinin 2025 Ulusal Coğrafi Stratejisi; BIM’i müşteri, yüklenici, elektrikçiler, tesisatçılar, bakımcılar ve kamu kurumları gibi tüm paydaşlar arasındaki iş birliği modelinin temel bir parçası olarak görmektedir. Strateji belgesi, dijitalleşme ve verimlilik hedeflerine ulaşmada BIM’in merkezi bir rol üstlendiğini özellikle vurgulamaktadır [121].

Norveç'in en büyük kamu inşaat ve emlak yönetim kuruluşlarından biri olan Norveç Kamu İnşaat ve Emlak Müdürlüğü (*Statsbygg*), ülkedeki BIM kullanımını yönlendiren ana kurumlardan biridir. Statsbygg 2010'lu yılların başından itibaren sorumlu olduğu projelerde BIM kullanımını zorunlu hale getirmiştir [122]. Statsbygg'nin yayımladığı ve güncellemeye devam ettiği BIM Kılavuzu (SBM), projelerde ve bina işlem süreçlerinde BIM kullanımına ilişkin teknik gereksinimleri hem genel hem de disiplinlere özgü şekilde tanımlamıştır. Kılavuzun içeriği önceki versiyonlardan ve kurumun yönettiği gerçek projelerden elde edilen deneyimlere dayanmaktadır. SBM'nin temel amacı, IFC formatında veri alışverişine dayalı, disiplinler arası uyumlu ve şeffaf bir modelleme süreci geliştirmektedir [123].

Şekil 4.3 Novorender Bulut Tabanlı BIM Portalı [124]

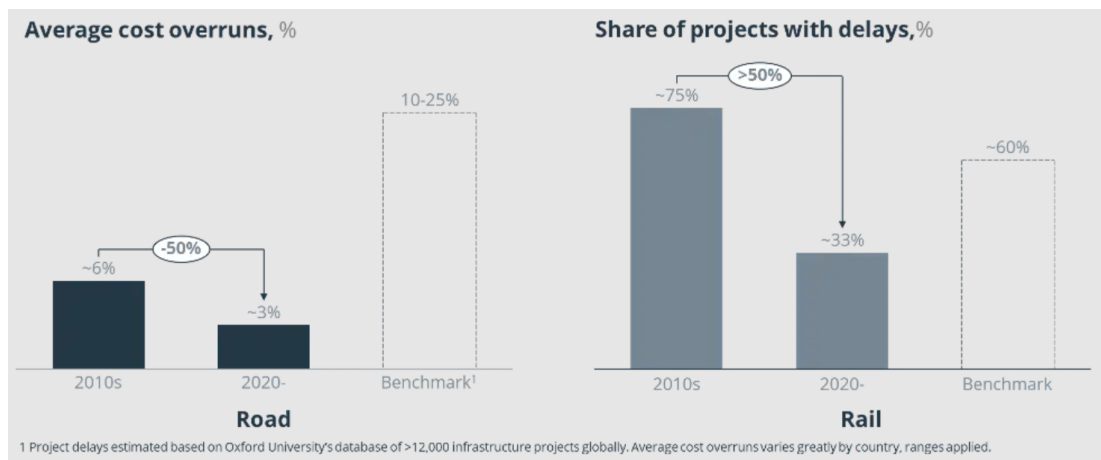


Özel sektör tarafında Norveç merkezli Novorender şirketi, büyük ve karmaşık BIM modellerini, nokta bulutlarını ve ortofotoları internet tarayıcısı üzerinden hızlıca görüntülemeyi ve paylaşmayı sağlayan bir bulut tabanlı platform geliştirmiştir (Şekil 4.3). Geleneksel BIM sistemlerinin yüksek donanım gereksinimi ve paylaşım zorluklarına çözüm sunan bu sistem, kullanıcıların herhangi bir manuel dönüştürme yapmadan verilerini doğrudan kullanabilmesini sağlar [124].

Norveç'te BIM kullanımının altyapı projelerine etkisi yapılan araştırmalarda sayısal olarak da ortaya konmuştur. 2010'lu yıllarda yol projelerinde maliyet aşımı %6

civarlarında iken 2020’li yıllarda bu oran %3 seviyelerine düşmüştür. Başka bir örnekte 2010’lu yıllarda demiryolu projelerinde gecikme yaşanma oranı %75 civarı seyrederken bu oran 2020’li yıllarda BIM’in benimsenmesiyle %33’lere kadar düşmüştür. Dünya genelindeki altyapı projelerinde yol yapımlarında maliyet aşımaları genellikle %10 ila %25 arasında değişirken, demiryolu projelerinde gecikme yaşanma oranı ortalama %60’ı bulmaktadır. BIM standartları uygulanan altı pilot projede ise projeye yönelik değişiklik taleplerinde %50’ye varan düşüşler elde edilmiştir (Şekil 4.4) [125].

Şekil 4.4 Raylı Sistem Projelerinde Maliyet ve Gecikme Karşılaştırması [125]

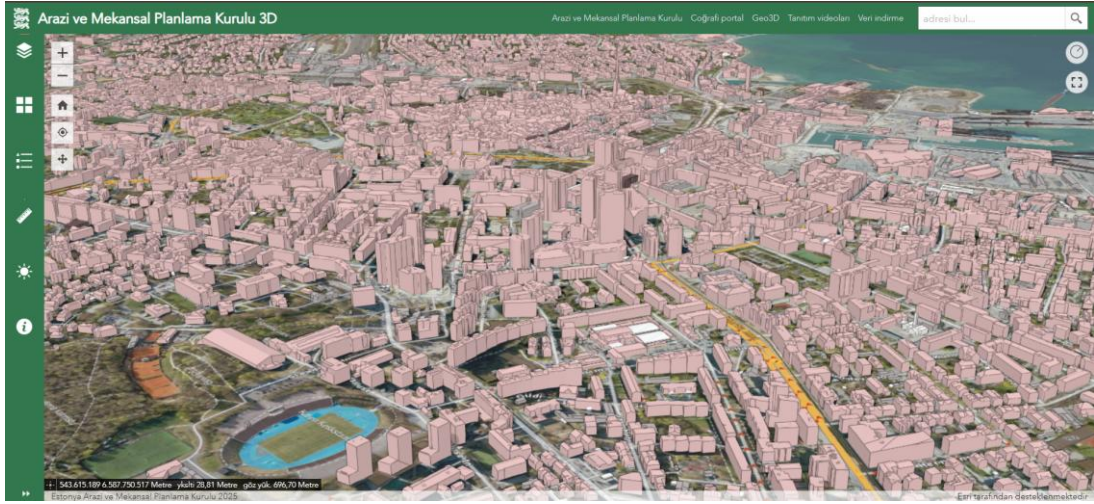


4.1.9 Estonya

Estonya’da 2017 yılında Ekonomik İşler ve İletişim Bakanlığı tarafından başlatılan “Dijital İnşaat Niyet Beyanı”, kamu alımlarında BIM kullanımını teşvik etmek amacıyla çeşitli devlet kurumlarının katılımıyla yürürlüğe girmiştir. Bu kapsamda yürütülen pilot projeler ve belirlenen kriterler, 2035 yılına kadar kamu yatırımlarında BIM kullanımını zorunlu hale getirmeyi hedeflemektedir [126]. Estonya, “e-inşaat” platformu aracılığıyla BIM modellerinin hem yapı ruhsat süreçlerinde hem de ulusal coğrafi bilgi sistemleriyle entegrasyonunda kullanılabileceği bir dijital altyapı sunmaktadır (Şekil 4.5). Ayrıca Ekonomi ve İletişim Bakanlığı tarafından yönetilen Building Register (*Ehitisregister*) sistemi, yapıların dijital ikizlerini içerecek şekilde geliştirilmektedir. 2024 yılında yayımlanan ulusal eylem planı ise ortak veri ortamlarında entegre bina modelleri, standart veri

formatları ve sınıflandırma sistemleri gibi konularda somut adımlar önererek BIM'in yaygınlaşmasına teknik ve idari altyapı oluşturmaktadır [127]. Ayrıca Estonya, ortak olduğu Rail Baltica uluslararası altyapı projesinde de BIM kullanarak dijital dönüşümün bölgesel düzeyde entegrasyonuna katkı sunmaktadır.

Şekil 4.5 Estonya e-İnşaat Platformu [128]



4.1.10 Finlandiya

Finlandiya'da inşaat sektörü, güvenilir paydaş yapısı ve açık standartlara dayalı sistemiyle BIM uygulamaları için uygun bir zemin sunmaktadır. 2007 yılında Senato Mülkleri, maliyeti 1 milyon avroyu aşan kamu projelerinde dijital bina modellerinin kullanımını zorunlu hale getirmiş ve yalnızca IFC uyumlu yazılımların kullanımına izin verilerek açık veri standartları benimsenmiştir [129]. Bu yaklaşımlar 2012'de yayımlanan "Ortak BIM Gereksinimleri (COBIM)" rehberiyle sistematik bir çerçeveye oturtulmuş [130] ve günümüze kadar bina tasarımı, yenileme ve tesis yönetimi gibi konuları kapsayan 13 sürüm yayımlanmıştır [131]. Altyapı projeleri için geliştirilen InfraBIM gereklilikleri ise 2015'te buildingSMART Finlandiya tarafından yayınlanmıştır [132]. Ayrıca inşaat bilgi sınıflandırmasını standardize etmeyi amaçlayan Talo 2000 sistemi, ülkede geniş ölçüde benimsenmiştir. BIM'in yalnızca tasarım süreciyle sınırlı kalmaması için yapı ruhsatlarında da dijitalleşmeye gidilmiş ve 2010'lu yıllardan itibaren IFC formatındaki BIM modelleri ile otomatik kontrol sistemleri konusunda çalışmalar yürütülmektedir [133]. 1 Ocak 2025 tarihinde yürürlüğe giren yeni İnşaat Yasası (751/2023) ile BIM tabanlı ruhsat sistemi yasal

zorunluluk haline gelmiş ve başvuru süreçleri dijital platformlar üzerinden yürütülmeye başlanmıştır [134].

Bu dönüşüm sürecinde, farklı aşamaları kapsayan ve belediyelerle iş birliği içinde yürütülen çeşitli projeler gerçekleştirilmiştir:

- **2015–2018:** KIRA-Digi projesi ile Cloudpermit ve Trimble ePermit platformlarının kullanımı yaygınlaştırılmış, belediyelerin %90’ı sisteme entegre olmuştur [133].
- **2018–2021:** RAVA1 ve RAVA2 projeleri kapsamında IFC tabanlı pilot uygulamalar yürütülmüş, ulusal düzeyde asgari BIM veri setleri tanımlanmış ve COBIM2020 ile uyumlu hale getirilmiştir [133].
- **2021–2023:** RAVA3Pro projesi, 23 belediyenin katılımıyla gerçekleştirilmiş, Helsinki Belediyesi liderliğinde yürütülmüştür. Proje kapsamında IFC tabanlı dosya alışverişi, otomatik yönetmelik kontrolleri, RYTI ile entegrasyon ve belediyelere yönelik eğitimler uygulanmıştır. Helsinki’de ilk otomatik kod kontrolü ve BIM koordinatör eğitimleri hayata geçirilmiştir. IFC, Finlandiya’da kalıcı arşiv formatı olarak resmen kabul edilmiştir [133].
- **2024–2027:** Yapılı Çevre Bilgi Sistemi (RYTJ) için 20 milyon Euro yatırım yapılmış, ruhsat sistemleriyle entegrasyonu sağlanmıştır. İnşa edilmiş BIM modellerinin RYTJ sisteminde arşivlenmesi planlanmaktadır [133].

Yerel düzeyde Helsinki, ulusal BIM stratejisinin uygulanmasında öncü bir rol üstlenmiştir. Şehirde Kruunuvuori Köprüsü ve Urban Environment House gibi projeler BIM tabanlı olarak yürütülmüş, kamu hizmet binalarında BIM kullanımına geçilmiş ve bu deneyimler ulusal RAVA projelerine model oluşturmuştur. Helsinki merkezli Aalto Üniversitesi bünyesindeki Aalto BIM araştırma grubu, dijital inşaat ve şehircilik süreçlerinin akademik ve kurumsal boyutlarını destekleyerek bilgi üretiminde önemli katkılar sağlamaktadır. Helsinki çıkışlı “Make a BIM” girişimi, yapay zekâ kullanarak 2B bina çizimlerinden otomatik olarak 3B BIM modeli ve veri üreten çözümler geliştirmektedir. Böylelikle büyük ölçekli projelerde manuel modelleme süreçlerini hızlandırmakta, güncel BIM verisi bulunmayan yapılara dijital ikiz benzeri çözümler

kazandırmakta ve Finlandiya'daki BIM ekosistemine yenilikçi bir boyut eklemektedir.

4.1.11 Diğer Avrupa Ülkeleri

İsveç'te BIM uygulamaları, İsveç Ulaştırma İdaresi'nin (STA) 2015 yılından itibaren projelerinde BIM'i temel yöntem olarak benimsemesiyle öne çıkmaktadır. STA, Stockholm Bypass ve Röfors Köprüsü gibi büyük altyapı projelerinde BIM'i hem uygulama hem de eğitim amaçlı kullanmıştır [135]. Bu süreci desteklemek amacıyla 2014 yılında açık standartlara dayalı yöntemlerin ve dijital araçların geliştirilmesini teşvik etmek üzere 180 kurumun katılımıyla BIM Alliance kurulmuştur [136]. Ayrıca proje yaşam döngüsünün tüm aşamalarını desteklemeye yönelik olarak geliştirilen CoClass¹¹ adlı sınıflandırma sistemi İsveç'te kullanılmaya başlanmıştır.

İsviçre'de BIM uygulamaları, merkezi düzenlemeler yerine uygulayıcı kuruluşların öncülüğünde gelişmektedir. 2021 yılı itibarıyla İsviçre Federal Demiryolları, 5 milyon İsviçre frangı üzerindeki bütçeye sahip belirli özellikteki binalarda ISO 19650-1 standardına uygun olarak BIM kullanımını zorunlu hale getirmiştir ve bu uygulamanın 2025 yılına kadar demiryolu altyapı projelerine de genişletilmesi hedeflenmektedir [82]. İsviçre devleti, 2020'de yayımladığı "Dijital İsviçre Stratejisi" ile dijitalleşme sürecini desteklemektedir [137]. İsviçre Mühendisler ve Mimarlar Birliği (SIA), *Digital Switzerland* platformu ise kamusal ve özel sektör iş birliğine dayalı bir dijitalleşme ekosistemi oluşturarak sürece katkı sağlamaktadır [138].

Çek Cumhuriyeti'nde BIM uygulamaları erken aşamada olsa da 2017 yılında yürürlüğe giren "BIM Yönteminin Uygulanması Konsepti" başlıklı 682 sayılı Hükümet Kararı, önemli bir dönüm noktası olmuştur [139]. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı'nın öncülüğünde hazırlanan ve 2018–2027 dönemini kapsayan ulusal plana

¹¹ **CoClass**, Yapı ve altyapı varlıklarını proje yaşam döngüsünün tüm aşamalarında tanımlamak için ortak bir dil sunar ve BIM süreçleriyle entegre çalışır.

göre BIM'in sektörde kademeli olarak yaygınlaştırılması hedeflenmiş, 2022 itibariyle kamuya ait büyük ölçekli projelerde zorunlu hale getirilmesi planlanmıştır.

Danimarka, BIM uygulamalarına erken dönemlerde yönelmiş ve 2007 yılında kamuya ait büyük ölçekli projelerde zorunlu hale getirilen düzenlemeleri 2013 itibarıyla sosyal konular dâhil olmak üzere devlet, bölge ve belediye düzeyindeki projelere genişletmiştir. Bu sürece paralel olarak, sınıflandırma sistemlerinin geliştirilmesine de önem verilmiş ve 2014 yılında geliştirilen CCS (*Cuneco Classification System*), inşaat sektöründe standartlaşmayı sağlamak amacıyla uygulamaya konmuştur [140].

Avrupa Birliği'nin dijitalleşme stratejileri kapsamında yer almalarına rağmen Belçika, Bulgaristan ve Hırvatistan'da BIM henüz yasal bir zorunluluk olarak uygulanmamaktadır. Belçika'da BIM'in kurumsal düzeyde yaygınlaşması daha çok bölgesel düzeyde alınan inisiyatiflerle şekillenmektedir. 2021 yılı itibarıyla ülkede BIM gerektiren projelerin oranı yalnızca %17,8 ile sınırlı kalmış ve bu durum uygulamaların henüz pilot ölçekli kaldığını göstermiştir [141].

Bulgaristan'da BIM'e yönelik yasal bir zorunluluk bulunmamaktadır. 2020–2030 Dijital Dönüşüm Stratejisi dijital beceri eksikliklerine ve inşaat sektöründe yasal düzenleme ihtiyacına dikkat çekmiş ancak BIM için bağlayıcı bir uygulama öngörmemiştir [142].

Benzer şekilde, Hırvatistan'da BIM yasal bir zorunluluk olmamakla birlikte kamu sektörü öncülüğünde 2017'de yayımlanan genel BIM kılavuzları ve 2021'de altyapı projelerine yönelik kapsamlı rehberlerle uygulamalar teşvik edilmektedir [143].

Yunanistan, 2021'de yayımladığı Dijital Dönüşüm Kitabı 2020-2025 strateji belgesi ile altyapı projelerinde BIM kullanımını teşvik etmiş ve akıllı şehirler bağlamında ulusal bir BIM merkezinin kurulmasını önermiştir [82].

İrlanda'da BIM yasal olarak zorunlu olmasa da 2014 yılından itibaren stratejik belgeler ile desteklenmiş, ulusal düzeyde Ireland 2040 vizyonu ve Build Digital programı aracılığıyla inşaat sektöründe dijital dönüşüm hedeflemektedir [82].

Letonya, 2019 yılında yayımladığı BIM yol haritası kapsamında 2025 itibarıyla bazı kamu alımlarında BIM kullanımını zorunlu hale getirmeyi planlamaktadır [82].

Litvanya’da 2014’te başlatılan Dijital İnşaat kamu girişimiyle BIM süreçleri geliştirilmiş, 2021 itibarıyla ise proje maliyet eşiklerine göre kademeli bir BIM zorunluluğu getirilmiştir [82].

Lüksemburg’da BIM yasal bir zorunluluk olmamakla birlikte Bina için Teknoloji ve Yenilik Kaynak Merkezi adlı çalışma grubu bünyesindeki çalışmalar ve IFC formatında sağlanan veri paylaşımları dijitalleşme sürecine katkı sunmaktadır [82].

Polonya’da BIM kullanımı henüz yasal zorunluluk olmasa da 2025 yılından itibaren büyük ölçekli projelerde, 2030 yılından itibaren ise tüm inşaat projelerinde zorunlu hale getirilmesi planlanmaktadır. BIM’in yasal zorunluluk planlamalarının yanında Polonya, 2023 yılı itibarıyla devletin sağladığı ücretsiz dijital platformlar üzerinden inşaat izinlerinin alınması ve dijital inşaat günlüğü tutulması gibi uygulamalarda dijitalleşme sürecini desteklemektedir [82].

Portekiz’de de BIM kullanımı henüz zorunlu hale getirilmemiştir ancak 2019-2023 Dijital Dönüşüm Stratejisi ve 2020 tarihli Dijital Geçiş Eylem Planı kapsamında dijitalleşme kamu yönetiminde temel bir öncelik olarak tanımlanmıştır [82].

Romanya’da 2022 yılında yayımlanan yol haritası ile BIM’in 2028 yılına kadar kademeli olarak zorunlu hale getirilmesi hedeflenmiş ve bu kapsamda çalışma grupları kurularak pilot uygulamalar yürütülmektedir [82].

Slovenya ise 2021 yılından itibaren belirli yatırım türlerinde BIM kullanımını yasal zorunluluk haline getirmiştir. 2024 yılında devreye alınan e-Bina (*eGraditev*) sistemiyle inşaat izin süreçlerinin dijitalleştirilmesi amaçlanmış ve bu uygulamanın 2026 yılına kadar ülke geneline yayılması planlanmaktadır [82].

4.2 Kuzey Amerika Kıtası

4.2.1 Amerika Birleşik Devletleri

2000’li yılların başlarından itibaren BIM araştırmalarına ciddi kaynak ayıran ABD, BIM alanındaki araştırma ve uygulama faaliyetleri diğer ülkelere kıyasla erken başlamıştır. İngiltere ve Singapur’da olduğu gibi yasal zorunluluklarla teşvik edilen BIM kullanımının aksine, ABD’de BIM firmalar tarafından verimlilik artışı, atıkların azaltılması ve iş güvenliğinin iyileştirmesi gibi avantajlar nedeniyle gönüllü olarak benimsenmesi sonucu yaygınlaşmıştır [144].

McGraw-Hill İnşaat Raporuna göre BIM benimsenme oranı 2007 yılında %17 iken 2012 yılında %70’in üzerine çıkmış ve birçok inşaat firması ileri veya uzman BIM seviyesine ulaşmıştır [145]. Amerikan Mimarlar Enstitüsü’nün 2020 yılı anketinde büyük firmaların %52’sinin BIM’e adapte olduğu, küçük firmaların ise yaklaşık %37’sinin BIM kullanmaya başladığı ifade edilmiştir [146]. Ulusal Yapı Bilimleri Enstitüsü (NIBS) tarafından yayınlanan 2021 yılında daha güncel tarihli yayınlanan raporda ise ülkedeki mimarlık firmalarının yaklaşık %74’ünün BIM kullandığı belirtilmiştir [147].

Amerika Genel Hizmetler İdaresi (GSA) ve ABD Ordusu Mühendisler Birliği (USACE), uzun yıllardır ülkede kamu projelerinde BIM kullanımını teşvik eden ve belirli uygulamalarda zorunlu hale getiren öncü kurumlardır. GSA, 2003 yılında Kamu Bina Servisi bünyesinde Ulusal 3B-4B BIM Programı’nı başlatmış ve bu kapsamda dokuz pilot proje ile BIM kullanımını test etmiştir. IFC tabanlı açık standartlara dayanan BIM modelleri, bu projelerde zorunlu hale getirilmiş ve BIM rehber serileri yayımlanarak sektöre yön verilmiştir [148]. USACE kurumu ise BIM uygulamaları açısından teknik ve kurumsal çerçevenin en detaylı tanımlandığı kurumlardan biridir. 2006 yılında yayımladığı “MILCON Dönüşüm Yol Haritası” ile BIM stratejilerini ortaya koymuş ve sözleşme şablonları, veri formatları ve teknik kılavuzlar gibi uygulamaya dönük belgeler geliştirilmiştir. 2020 yılında hayata geçirilen USAACE BIM Nesne Kütüphanesi (UBOL) ile tasarımcılar için hazır BIM nesneleri sunarak projelerde tutarlılığı ve verimliliği artırmayı hedeflemiştir. 8.500’den fazla BIM nesnesi ile yayımlanan kütüphanenin 35.000’den fazla BIM nesnesine ulaşması

beklenmektedir [149]. USACE ayrıca ECB 2020-9 gibi teknik bültenlerle BIM nesnelerinin kullanımına yönelik detaylı rehberler hazırlamış, BIM Proje Yürütme Planı şablonları ile de proje yönetim süreçlerini kolaylaştırmayı hedeflemiştir [150].

ABD’de BIM standardizasyonunda önemli rol üstlenen diğer bir kuruluş olan NIBS, 2003 yılında Ulusal BIM Standardı (NBIMS-US) geliştirme çalışmalarını başlatmıştır. Ülkedeki BIM uygulamalarının uyumlu, tutarlı ve birlikte çalışılabilir biçimde yürütülmesi hedefleyen ulusal standardın ilk versiyonu 2007, ikinci versiyonu 2012 ve üçüncü versiyonu 2015 yılında yayımlanmıştır. 2016 yılında yapılan bir araştırma dünya genelinde 28 farklı LOD standardı kullanıldığını tespit etmiştir. NBIMS-US son versiyonu ise bu standartlardan sadece üçüne yer verecek şekilde oluşturulmuştur. Bu nedenle hazırlanması planlanan dördüncü versiyonun bu anlamda daha kapsayıcı olması ve farklı LOD standartlarını da dikkate alması hedeflenmektedir [151].

2016 yılında Miami, Florida’daki eski bir federal binanın yenilenmesi sürecinde, yapının lazer tarama yoluyla elde edilen nokta bulutu verileri Revit ortamında detaylı bir BIM modeline dönüştürülmüştür (Şekil 4.6). Binanın tarihi niteliği ve süsleme detaylarının fazlalığı projeyi zorlaştırsa da Revit yazılımı ve uzman ekip desteğiyle yüksek doğrulukta bir model oluşturulmuştur. Yapılan çalışma ABD'deki eski kamu binalarının dijitalleştirilerek modernize edilmesine yönelik başarılı bir BIM kullanım örneği sunmaktadır [152].

Şekil 4.6 Federal Binanın Yenilenmesinde BIM Kullanımı [152]



Federal Karayolları İdaresi (FHWA) tarafından yayımlanan “Altyapı için BIM: Ulusal Stratejik Yol Haritası”, ulaşım altyapısının tüm yaşam döngüsü boyunca verilerin yapılandırılması, yönetilmesi ve kullanılması için açık standartlara dayalı, iş birliğine açık bir çalışma modeli olarak “BIM for Infrastructure” kavramını tanımlar. Yol haritası, eyalet ulaştırma departmanlarının bu yaklaşımı benimseyebilmesi için ülke çapında ortak bir politika çerçevesi, açık veri paylaşım standartları, uygulama yöntemleri ve güçlü bir personel eğitim–yetkinlik geliştirme programı oluşturmasını hedeflemektedir [153].

Özel sektör de BIM ekosisteminde etkin bir rol üstlenmiştir. Autodesk, Bentley ve Trimble gibi yazılım şirketleri, BIM çözümlerini sürekli geliştirerek kamu ve özel projelerde kullanılabilir hale getirmiştir. Bununla birlikte ülkede akademik kurumlar BIM eğitimi ve araştırmaları konusunda çalışmalar yürütse de eğitim ve sertifikasyon programları sınırlı kalmıştır [1].

4.2.2 Kanada

Kanada’da BIM uygulamaları merkezi bir zorunlulukla değil, sektörel girişimler ve meslek kuruluşlarının öncülüğünde gelişmektedir. Canada BIM Council (CanBIM), Institute for BIM in Canada (IBC) ve buildingSMART Canada gibi kurumlar, openBIM ve IFC tabanlı standartların yaygınlaşmasını desteklemektedir. Federal düzeyde “BIM Maturity at Scale” gibi projeler yürütülmekte, bu kapsamda ülke genelinde BIM olgunluğunu artırmaya yönelik yol haritaları geliştirilmektedir. Toronto ve Vancouver gibi büyük kentlerde uygulama daha ileri seviyedeysen, ülke genelinde standartların ve yetkinliklerin farklılık göstermesi temel bir zorluk olarak öne çıkmaktadır [154].

4.3 Asya Kıtası

Asya’da Japonya, Singapur, Çin ve Güney Kore BIM’in benimsenmesi konusunda en ileri ülkelerdir. BIM teknolojilerinin en dinamik gelişme gösterdiği bölgelerden biri hızlı kentleşme, nüfus artışı ve altyapı yatırımlarıyla öne çıkan Asya-Pasifik’tir. Çin, Güney Kore ve Japonya gibi ülkelerde yürütülen büyük projeler, dijital çözümlere olan ihtiyacı artırmakta ve bu durum BIM teknolojilerinin daha fazla

kullanılmasına zemin hazırlamaktadır. Bölgedeki inşaat şirketleri dijital teknolojilerle iş gücü verimliliğini artırmak, koordinasyon hatalarını azaltmak ve maliyet etkinliği sağlamak amacıyla BIM çözümlerine giderek daha fazla yönelmektedir [81].

4.3.1 Japonya

Japonya’da dijital inşaat teknolojileri proje türüne göre BIM ve CIM (*Civil/Construction Information Modelling*) olmak üzere iki kavram üzerinden değerlendirilmektedir. BIM kavramı, dünyada olduğu gibi Japonya’da da mimari yapı projeleri için kullanılırken bina tasarımı, yapım ve işletme süreçlerinde dijital modelleme, iş birliği ve bilgi yönetimi sağlar. CIM ise Japonya’ya özgü olarak tanımlanan ve inşaat mühendisliği kapsamındaki köprü, yol, tünel, baraj gibi altyapı projelerinde uygulanan modelleme yaklaşımıdır. CIM kavramı, ilk kez 2007 yılında yayımlanan tanıtım kılavuzuyla gündeme gelmiş ve 2016 yılında Arazi, Altyapı, Ulaştırma ve Turizm Bakanlığı (MLIT) tarafından başlatılan i- Construction politikası ile daha da öne çıkmıştır. “i- Construction” politikası, bilgi ve iletişim teknolojilerinin inşaat süreçlerine entegrasyonunu hedefleyerek BIM’i bu bağlamda temel bir dijitalleşme aracı olarak konumlandırmıştır [155].

MLIT tarafından 2019 yılında yayımlanan “Gelecek Vizyonu ve BIM Yol Haritası” strateji belgesi kapsamında BIM’in tasarım, inşaat, işletme ve bakım süreçlerinde daha çok yer alması gerektiği belirtmektedir. İlgili strateji planı modelleme yöntemlerinin standartlaştırılmasından maliyet tahmini sistemlerinin geliştirilmesine, bina onay süreçlerinin BIM ile dijitalleştirilmesinden küçük ve orta ölçekli işletmelere yönelik destek mekanizmalarına kadar çok boyutlu bir dönüşüm planı içermektedir. Ayrıca, BIM’i yapay zekâ ve IoT cihazlarıyla ilişkilendirerek büyük veri yönetiminin sağlanmasına yönelik ileri düzey hedefler de belgede yer almaktadır [156].

2020 yılında MLIT, ISO 19650 standartlarını temel alan BIM standart iş akışlarına yönelik rehberler yayınlamıştır. 2023 itibariyle bakanlığın doğrudan denetimi altındaki büyük mühendislik ve inşaat projelerinde BIM ve CIM uygulaması zorunlu hale getirilmiştir [156]. MLIT tarafından 2022 yılında yürütülen ankette Japon inşaat şirketlerinde BIM benimsenme oranı %48,4 olarak belirlenirken, 2024 yılında

gerçekleştirilen anketlerde bu oran %58,7 seviyelerine çıkmıştır. 2024 yılında Japonya'daki BIM pazarı yaklaşık 0,46 milyar USD seviyesine ulaşmış olup 2029'da 0,84 milyar USD'ye çıkması beklenmektedir [157].

Japonya'da BIM kullanımı, kamu destekli pilot projeler ve sektörel iş birlikleri ile yaygınlaştırmaya çalışılmaktadır. Örneğin, Narita Havalimanı'nda Archicad kullanılarak yapı ve MEP planlaması tek çatı altında yürütülmüş, fikirlerin görselleştirilmesi ve güvenlik kontrolleri kolaylaştırılmıştır. Shinjuku Federal Ofis Binası'nda BIM'in tasarımdan işletmeye kadar kullanılması, iş verimliliğini ve doğruluğu artırmıştır. Yeni Sukagawa Belediye Binası projesi, yerel yönetimde BIM'in tasarım ve yapı sonrası aşamalarda kullanıldığının başarılı bir örneğidir. Steel Nest ofis binasında karmaşık yapısal geometriler BIM sayesinde kolaylıkla modellenmiş ve tasarım süreci hızlanmıştır. Ayrıca Şekil 4.7'de sunulan Toho Gakuen Müzik Okulu binasının yapımında kullanılan BIM mimarlar, inşaat mühendisleri ve mekanik mühendisleri arasında olağanüstü bir koordinasyon sağlamış ve potansiyel çakışmalar gerçek zamanlı olarak tespit edilip çözümlenebilmiştir [158]

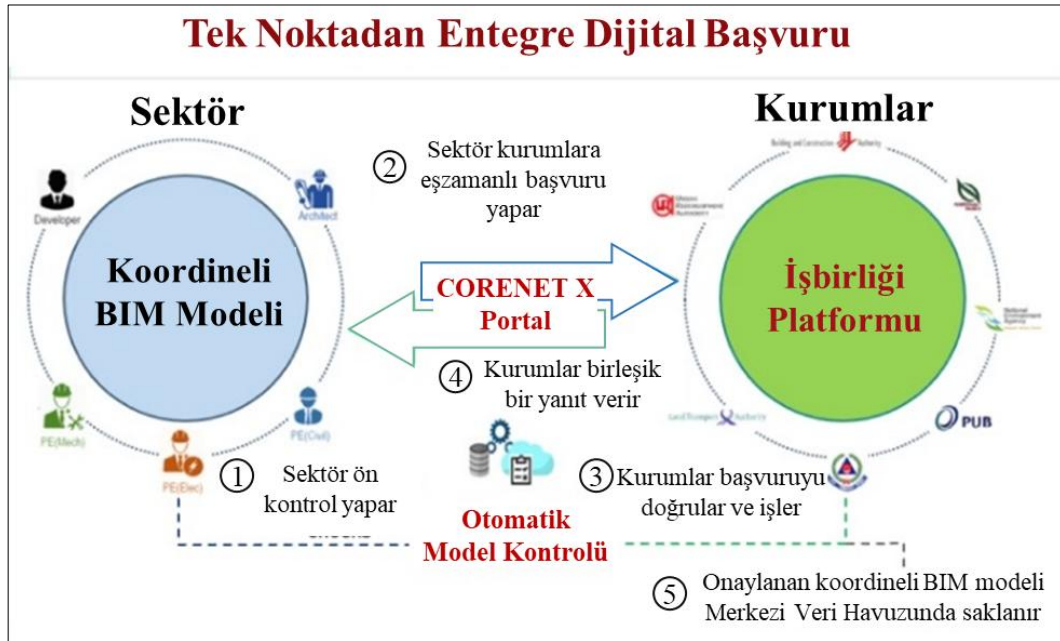
Şekil 4.7 Yapımında BIM Kullanılan Toho Gauken Müzik Okulu Binası [158]



4.3.2 Singapur

Singapur'da e-ruhsat sistemine geçiş süreci 2000'li yılların başında PDF tabanlı dijital başvurularla başlamış ve 2010'dan itibaren BIM tabanlı başvuru modeline geçilerek daha gelişmiş bir dijital dönüşüm hedeflenmiştir. BIM tabanlı başvurular ilk olarak gönüllü uygulamalarla desteklenmiş, ardından 20.000 m² üzeri projeler için mimari teslim zorunluluğu getirilmiştir. Bu kapsamda 2014'ten itibaren mühendislik disiplinlerini de kapsayacak şekilde zorunluluk genişletilmiş, 2015 itibarıyla 5.000 m² üzeri tüm yeni projelerde BIM teslimi yasal zorunluluk haline getirilmiştir. Bu süreçte Yapı ve İnşaat Otoritesi (*Building and Construction Authority, BCA*) ile Konut ve Kalkınma Kurulu (*Housing & Development Board, HDB*) gibi devlet kurumları önemli rol oynamıştır. Özel sektördeki firmalar da BIM teknolojilerini aktif olarak projelerine entegre etmektedir [72].

Şekil 4.8 CORENET X Yapısının Özeti [159]



CORENET X, Singapur'da yapı izin süreçlerini dijitalleştirmek ve farklı kurumlardan gelen denetimleri ortak bir BIM modeli üzerinden yürütmek amacıyla geliştirilen yeni nesil bir platformdur (Şekil 4.8). BCA ile Ulusal Kalkınma Bakanlığı iş birliğiyle geliştirilen sistem, geleneksel PDF tabanlı başvuruların yerine model tabanlı başvuru sürecini getirerek sektörde köklü bir dönüşümü hedeflemektedir.

Projeler, disiplinler arası birleşik BIM modeliyle birlikte sunulmakta, böylece farklı kurumlar tarafından yapılan değerlendirmeler tek bir model üzerinden senkronize bir şekilde yürütülmektedir. Sistem, Singapur'a özel olarak geliştirilen IFC-SG (IFC for Singapore) standardını temel alarak, coğrafi referanslı açık BIM verilerinin (openBIM) kullanımını zorunlu kılmaktadır [159].

2021'de tanıtılan CORENET X platformu için 2023–2027 yılları arasında kademeli bir geçiş süreci planlanmıştır. Bu kapsamda, 1 Ekim 2025 itibarıyla brüt alanı 30.000 m² üzerindeki tüm yeni projelerde sistemin kullanımı zorunlu hale gelecektir. 2026 yılında tüm yeni projeleri kapsayacak şekilde uygulama genişletilecek, 2027 itibarıyla ise devam eden projelerin de platforma entegre edilmesi hedeflenmektedir. BIM modellerinin e-teslimine yönelik olarak yayımlanan resmi dokümantasyonlarda ölçek, renk, dosya formatı, yorumlama ve isimlendirme gibi konulara dair ayrıntılı standartlar tanımlanmıştır. İlgili standartlar ruhsat başvuru süreçlerinde daha yüksek veri doğruluğu, denetim süreçlerinde kolaylık ve kurumlar arası iş akışı bütünlüğü sağlamayı amaçlamaktadır [72].

4.3.3 Çin

Çin'de BIM'in gelişimi 21. yüzyılın başlarında başlamış, ancak yaygın olarak benimsenmesi ve uygulanması 2010 sonrasında hız kazanmıştır. 2011 yılından itibaren Çin hükümeti, inşaat sektöründe BIM teknolojisinin benimsenmesini teşvik etmek için çok sayıda politika ve standart belge yayınlamıştır. Konut ve Kentsel-Kırsal Kalkınma Bakanlığı (MOHURD), BIM'i endüstriyel bilişimin teşvikinde önemli bir bileşen olarak konumlandırmış ve BIM uygulamasının hızlandırılmasını bir politika hedefi olarak belirlemiştir. 2015 yılında özellikle net bir hedef belirlenmiştir: "2020 yılı sonuna kadar, büyük ve orta ölçekli kamu yatırım projelerinde BIM benimsenmesi %90'ın üzerine çıkmalıdır". Daha sonra, yerel yönetimler kendi BIM tanıtım yönergelerini ve zorunlu önlemlerini uygulamaya koymuştur [157].

Çin'de BIM standartlaşmasının temel çerçevesi, 2016 tarihli GB/T 51212-2016 ile tanımlandı. İzleyen yıllarda tasarım teslimleri (2018), üretim tasarımı (2019) ve veri koruma-değişim biçimleri (2021) için tamamlayıcı ulusal standartlar yayımlandı. MOHURD ve sektör dernekleri uygulama kılavuzlarıyla sistemi desteklerken, çerçeve

yerel gereksinimler korunarak ISO 19650 ile giderek daha uyumlu hâle getirildi [157]. Çin’de BIM teknolojisinin gelişim sürecinde atılan adımlar Şekil 4.9’te sunulmaktadır.

Çin’de BIM teknolojisinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasında kamu kurumları önemli rol oynamaktadır. Kurumlar arasında inşaat ve kentsel planlamadan sorumlu merkezi bakanlıklar, il ve şehir düzeyinde BIM politika uygulama organları, BIM standartlarının geliştirilmesinden sorumlu teknik standardizasyon kurumları ve büyük kamu projelerinde BIM uygulamasını denetleyen kamu projesi yönetim kurumları yer almaktadır [160].

Şekil 4.9 Çin’de BIM Teknolojisinin Gelişim Tarihi [157]



Çin’de, 2011’den itibaren beş yıllık kalkınma planlarında BIM uygulamalarının yaygınlaşmasını hedefleyen düzenlemeler yayımlamıştır. Son olarak 2021–2025 dönemini kapsayan 14. Beş Yıllık Plan ile sektörde “akıllı inşaat—endüstriyelleşme—sayısallaşma” ekseninin kuvvetlendirilmesi amaçlanmıştır. Planda, 2025 yılına kadar BIM teknik çerçevesi ve standart sisteminin büyük ölçüde

tamamlanması, BIM'in tasarım-üretim-şantiye süreçlerinde bütünleşik kullanımının yaygınlaşması, bulut tabanlı BIM servislerinin teşvik edilmesi ve ruhsat/izin süreçlerinde BIM'e dayalı pilot uygulamaların başlatılması gibi somut hedefler yer almaktadır [161]. Ayrıca MOHURD'un 2022 tarihli "Kentsel-Kırsal İnşaat Alanında Karbon Zirvesi Uygulama Planı", BIM ile şehir bilgi modeli platformlarının birlikte kullanımıyla dijital ikiz yaklaşımının ve enerji verimliliği odaklı işletme pratiklerinin yaygınlaştırılmasını öngörmektedir [162].

Şekil 4.10 Şangay Göğüs Hastalıkları Eğitim-Araştırma Hastanesi BIM Modeli [157]



Çin'de güçlü politika desteği ve standartların hızla oluşturulması, BIM teknolojisinin yaygınlaşmasını önemli ölçüde hızlandırmıştır. Büyük kamuya ait tasarım enstitüleri ve inşaat firmaları, bu sürece erken uyum sağlayarak kendi BIM ekiplerini kurmuş ve iç standartlarını geliştirmiştir. 2016 sonrası dönemde BIM benimseme oranı belirgin biçimde artarken, 2018 civarındaki anketlerde büyük inşaat firmalarının yaklaşık %36'sının BIM'i aktif olarak kullandığı görülmüştür. BIM teknolojisi hızlı tren istasyonları, havalimanları ve büyük ölçekli kentsel projelerde ülkede kullanılmıştır. Örneğin 2016 yılında inşaatına başlanan Şangay Göğüs Hastalıkları Eğitim-Araştırma Hastanesinin tam yaşam döngüsü BIM kullanımı ile yönetilmiştir (Şekil 4.10). Uygulanan yaklaşım teslimin plandan yaklaşık 90 gün önce tamamlanmasını, yapısal işlerin ilk kontrolde kabulünü ve iş kazasız ilerlenmesini sağlamıştır. BIM yatırım maliyeti düştükten sonra toplam yatırımın yaklaşık %7,5'i

düzeyinde ekonomik kazanım elde edilmiştir [157]. Çin’de BIM ile yürütülen öne çıkan projeler arasında, ülkenin finans merkezinin simge yapılarından 128 katlı Şanghay Kulesi, Şanghay Disneyland Tesisi ve Phoenix Medya Merkezi yer almaktadır.

4.3.4 Güney Kore

Güney Kore’de BIM kullanımı, 2010 yılında hükümetin öncülüğünde başlatılan bir adaptasyon planı ile kurumsal çerçeveye oturtulmuştur. Arazi, Altyapı ve Ulaştırma Bakanlığı (MOLIT) genel stratejileri belirlerken, Kamu İhale Servisi (Public Procurement Service, PPS) uygulamaya dönük ayrıntılı planlar ve rehberler hazırlamıştır. İlk plan, 50 milyar KRW (Kore Wonu) üzerindeki kamu projelerinde tasarım aşamasından başlayarak 2016 itibarıyla tüm proje aşamalarında BIM’in zorunlu hale gelmesini hedeflemiş, ancak sektörün hazırlık eksiklikleri nedeniyle bu hedeflere ulaşamamıştır [163].

2020 yılında BIM’e yönelik güncellenmiş on yıllık yol haritası yayımlanmıştır. Yeni stratejide daha kademeli bir geçiş planlanmış, proje maliyet sınırları düşürülerek daha geniş kapsamda kamu projelerinde BIM kullanımının teşvik edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca Güney Kore’nin şehirlerdeki arazilerin geliştirilmesinden ve arazi ve konutların bakımı ve yönetiminden sorumlu olan devlete ait bir kuruluş olan Kore Arazi ve Konut Kurumu (LH) için özel BIM hedefleri tanımlanmış ve 2024’ten itibaren tüm LH projelerinde BIM zorunluluğu getirilmiştir. 2024-2026 ve 2027-2030 arası dönemlerde ise özel sektör projelerinin de kademeli olarak kapsama alınması planlanmıştır [163].

Güney Kore’de BIM tabanlı süreçlerin dijital dönüşümünü hızlandırmak amacıyla K-BIM e-başvuru sistemi geliştirilmiştir. Bu kapsamda, openBIM yaklaşımını temel alan uluslararası standartta IFC veri modeli kullanılarak, başvuru süreçlerini yönetecek bir prototip sistem geliştirilmiştir. Sistem kod kontrolü, başvuru, ön kontrol ve otomatik kural oluşturma olmak üzere dört temel modülden oluşur [164].

Güney Kore’de BIM uygulamaları açısından Incheon Uluslararası Havalimanı, çok aşamalı süreçlerinde BIM’in tasarım, inşaat ve kalite yönetiminde kullanıldığı

öncü bir örnek olmuştur. Havalimanının Terminal 2 aşamasında BIM tüm ulaşım tesisleri dahil olmak üzere geniş ölçekte uygulanmış, ileri aşamalarda ise VR, AR ve mobil yönetim sistemleri ile desteklenmiştir. Godeok Köprüsü projesi ise tasarım aşamasında yapısal çözümler için BIM'den faydalanılan, 4B simülasyon ve VR ortamıyla paydaşların sürece dahil edildiği önemli bir altyapı projesidir (Şekil 4.11) [163].

Şekil 4.11 Tasarım Aşamasında BIM Kullanılan Godeok Köprüsü [163]



4.3.5 Birleşik Arap Emirlikleri

Dubai Belediyesi, yapı sektöründe dijitalleşmeyi teşvik etmek ve akıllı şehir vizyonu doğrultusunda inşaat süreçlerini dönüştürmek amacıyla BIM kullanımını kademeli olarak zorunlu hale getirmiştir. 2013 yılında bazı yapı türleri için BIM kullanımının şart koşulmasıyla zorunluluk başlatılmıştır. 2014 yılında yayımlanan Genelge No. 196 ile 40 kat üzerindeki binalar ile hastane ve üniversite gibi özel amaçlı yapılar için mimari ve elektro-mekanik projelerde BIM kullanımı zorunlu hale getirerek sektördeki farkındalığı artırmış ve uygulamaların yaygınlaşmasına zemin hazırlamıştır. 2015 tarihli Genelge No. 207 ile BIM zorunluluğunun kapsamı genişletilmiştir ve 20 katı aşan veya 18.581 m²'yi geçen projeler için de BIM kullanımı zorunlu hale getirilmiş ve kamu yapıları ile özel ofis taleplerini kapsayacak şekilde

düzenleme derinleştirilmiştir. 2016 yılı itibarıyla büyük ölçekli ve kamusal projelerde BIM kullanımının yasal zorunluluk haline geldiği bildirilmiş olsa da [165] zorunlulukların başlangıçta belirli bir standart çerçevesinde net tanımlarla desteklenmemesi, uygulama sahasında belirsizliklere neden olmuştur [166].

2018 yılından itibaren Dubai Belediyesi ve Dubai Bina Ruhsat Geliştirme Komitesi, BIM kullanımını daha yaygın hale getirebilmek için kapsamlı bir dijitalleşme stratejisi benimsemiştir. Akıllı Dubai vizyonu kapsamında geliştirilen bu strateji ruhsat süreçlerinin dijital ortama taşınmasını hedeflemiş ve böylece BIM'in yasal süreçlere entegrasyonunu sağlayacak teknik ve yönetsel adımlar atılmıştır [167]. 2020–2021 döneminde tüm ruhsat otoriteleri için ortak BIM standartları belirlenmiş, CBS destekli altyapılar geliştirilmiş ve bazı bölgelerde pilot uygulamalar devreye alınmıştır. Aynı dönemde, Dubai Bina Ruhsat Sistemi'ne (Dubai BPS) ait mobil uygulamanın ilk sürümleri test edilmeye başlanmıştır. 2022 yılı itibarıyla, ruhsat verme yetkisine sahip tüm kurumlar—Dubai Belediyesi, Dubai Kalkınma Kurumu, Trakhees ve Dubai Entegre Ekonomik Bölgeler Kurumu—tek bir dijital platform üzerinden entegre edilmiştir. Süreç içerisinde BIM uygulamalarını başarıyla kullanan firmalar için teşvik mekanizmaları da geliştirilmiştir [168].

2023 yılında, birleşik dijital ruhsat sistemi resmen yürürlüğe girmiş ve tüm başvurular bu sistem üzerinden alınabilir hale gelmiştir. Yeni sistemde BIM tabanlı otomatik denetim süreçleri ve çevrim içi ödeme mekanizmaları zorunlu hale getirilmiş, yapı izinlerinin dijital ortamda daha şeffaf ve hızlı bir şekilde tamamlanması sağlanmıştır. 2024 yılı itibarıyla ise BIM teslimi, yapı türüne göre ruhsat başvurusunun zorunlu bileşeni haline gelmiştir. Bu kapsamda mimari projeler için 20 katı aşan, statik projeler için 40 katı aşan binalar, ayrıca 20.000 m²'den büyük mimari veya 30.000 m²'den büyük statik alanlara sahip yapılar BIM model sunma zorunluluğuna tabi tutulmuştur. Hastaneler, üniversiteler gibi özel amaçlı yapılar ile tüm kamu projeleri de kapsam içine alınmıştır. Başvuru sürecinde IFC formatındaki BIM dosyalarının yanı sıra, CAD çıktıları ve gerekirse orijinal yazılım formatlarıyla da dosya teslimi yapılması beklenmektedir. Tüm bu süreçler, Dubai BIM Standardı içinde belirlenen LOD düzeyleri, dosya isimlendirme kuralları ve teknik gereksinimlere uygun şekilde yürütülmektedir [168]. Dubai Belediyesi öncülüğünde

Birleşik Arap Emirlikleri'nde yürütülen düzenlemeler inşaat sektöründe dijital dönüşüm sürecini hızlandırmayı amaçlamaktadır. Bu süreçte BIM verilerinin CBS ile entegrasyonu, dijital ikiz kavramına uygun veri altyapılarının kurulması ve akıllı denetim sistemlerinin geliştirilmesi yönünde de adımlar atılmıştır [72].

BÖLÜM 5

BIM VE CBS ENTEGRASYONU İÇİN DÖNÜŞÜM YAKLAŞIMLARININ İNCELENMESİ

Beşinci bölümde, ilk olarak IFC standardın kavramsal temelleri, gelişim süreci ele alınmıştır. ISO 16739-1 standardına dayalı nesne tabanlı veri modeli, çok katmanlı şema yapısı ve bileşenleri temsil etme yetenekleri açıklanmıştır. Kaynak, Çekirdek, Ortak ve Alan katmanlarının içerikleri, kalıtım mekanizması, nesneler arası ilişkiler ve EXPRESS tabanlı tanım dili tanıtıldı. Uygulamada IFC şemasının tamamının nadiren kullanıldığı, veri paylaşım süreçlerinin IDM ve MVD yapılarıyla amaca göre kurgulandığı belirtilmiştir. Konumsal doğruluğun hiyerarşik yerleşim sistemi ve *LoGeoRef* yöntemleri ile nasıl kurgulandığı, coğrafi referanslama süreçlerinde *IfcMapConversion* gibi sınıfların kritik rol oynadığı açıklanmıştır. 3B geometrik temsil teknikleri olarak B-Rep, CSG ve SS yöntemlerinin kullanımı, semantik ilişkilerin tür ve bileşen mantıkları üzerinden tanımlandığı ifade edilmiştir. Malzeme, özellik kümeleri ve kullanım bilgileri gibi özniteliklerin modele nasıl entegre edildiği ile birlikte IFC'nin BIM–CBS entegrasyonundaki rolü ve CityGML gibi CBS odaklı modellerle veri eşleştirme potansiyeli vurgulanmıştır.

CityGML 3.0 standardının modüler yapısı ele alınmış, çekirdek modül ile tematik modüllerden oluşan iki ana bileşeni tanıtılmıştır. Çekirdek modülün geometrik, topolojik ve semantik tanımların ortak referans katmanını oluşturduğu, tematik modüllerin ise binalar, köprüler, tüneller, ulaşım altyapısı, bitki örtüsü, su yüzeyleri ve arazi kullanımı gibi kentsel bileşenlerin ayrıntılı biçimde modellenmesini sağladığı açıklanmıştır. ADE mekanizmasının, standart yapıya yeni kavramsal varlıklar ve öznitelikler eklenerek gürültü haritalama, enerji verimliliği, 3B kadastro veya afet yönetimi gibi özel senaryolara uyarlanabilmesine imkân tanıdığı aktarılmıştır. LoD0'dan LoD3'e uzanan ayrıntı düzeyleri incelenmiştir. Geometrik modellemede çoğunlukla B-Rep yönteminin kullanıldığı ve koordinatların genellikle bir Koordinat Referans Sistemi ile ilişkilendirilerek gerçek dünya konumuna referans verecek şekilde tanımlandığı belirtilmiştir. Kodlama açısından, XML/GML tabanlı yapının esneklik sunduğu ancak veri boyutunu artırdığı ve ayrıştırma sürecinde ek karmaşıklık yarattığı, CityJSON'un ise aynı kavramsal modeli daha sade ve hafif bir

formatta sunarak kullanım kolaylığı sağladığı belirtilse de CityGML'in ayrıntılı, genişletilebilir yapısı ile kurumsal altyapılarda daha yaygın tercih edildiği de ifade edilmiştir. LandInfra standardı tanıtılmış IFC, CityGML ile kıyaslanarak geliştirilme amaçları, odaklandıkları temalar ve veri yapıları üzerinden karşılaştırmalı olarak detaylandırılmıştır.

Ardından BIM ve CBS entegrasyonunun iki temel aşaması olan geometrik ve semantik dönüşüm süreçleri ele alınmıştır. Geometrik düzeyde, BIM modellerinde kullanılan parametrik geometrilerin CBS'de yaygın kullanılan temsil geometrisine dönüştürülmesi, coğrafi referanslama ile modelin gerçek dünya koordinat sistemine aktarılması ve modelin kullanım senaryosuna uygun LOD düzeylerinin eşleştirilmesi konuları incelenmiştir. Semantik düzeyde ise yapı bileşenlerinin türü, malzemesi, işlevi ve ilişkileri gibi özniteliklerin korunarak aktarılması için kullanılan öznitelik çıkarımı, semantik eşleştirme, semantik çıkarım ve semantik birleştirme yöntemleri anlatılmıştır. Ardından literatürdeki diğer entegrasyon yaklaşımları incelenmiştir. Bu yaklaşımlar veri kümesi tabanlı, veri modeli tabanlı, şema genişletme, sistem tabanlı, uygulama tabanlı, hizmet tabanlı ve ontoloji tabanlı yaklaşımlar altında sınıflandırılarak ele alınmıştır. Her bir yöntemin dönüşüm adımları, avantajları, sınırlılıkları ve birlikte çalışabilirliğe katkıları karşılaştırılmış özellikle geometrik–semantik bütünlüğün korunması ve doğru format eşleştirmesi konularına vurgu yapılmıştır. Son olarak, ISO 19166 standardında tanımlanan BIM–CBS Kavramsal Eşleme (B2GM) yaklaşımının, IFC nesnelerinin CityGML nesnelere geometrik ve semantik düzeyde eşleştirilmesi, LoD uyumunun sağlanması ve verilerin görselleştirilmesi süreçlerinde standart bir çerçeve sunduğu aktarılmıştır.

5.1 IFC Veri Modelinin Kavramsal Temelleri

IFC (*Industry Foundation Classes*), mimarlık, mühendislik ve inşaat (AEC) sektöründe veri paylaşımını kolaylaştırarak disiplinler arası birlikte çalışabilirliği desteklemek amacıyla geliştirilen, açık ve tarafsız bir veri modelidir [169]. İlk tanımı, 1995 yılında Amerika ve Avrupa'dan sektör temsilcilerinin bir araya gelerek oluşturduğu Uluslararası İş Birliği İttifakı (*International Alliance for Interoperability, IAI*) tarafından yapılmıştır [170]. Tanımda AEC endüstrisinde birlikte çalışabilirliği sağlama amacına dayalı bir vizyon, küresel ölçekte disiplinler arası teknik uygulamalar

ile veri paylaşımını mümkün kılacak bir standardizasyon geliştirme misyonu belirtilmiştir. IFC, bina ve inşaat sektöründe kullanılan bilgilerin yaşam döngüsü boyunca farklı disiplinler arasında değişimini ve entegrasyonunu sağlayan, nesne tabanlı, açık ve yazılım bağımsız bir veri modeli olarak tanımlanmıştır [169]. İlerleyen süreçte buildingSMART International (bSI) çatısı altında kurumsallaşmıştır. Günümüzde IFC'nin geliştirme ve güncelleme çalışmaları bSI bünyesindeki teknik komiteler tarafından sürdürülmektedir [170].

IFC, "ISO 16739-1:2024" standardı çerçevesinde tanımlanmakta olup farklı BIM yazılımları arasında bilgi alışverişinin tutarlı ve kayıpsız biçimde yürütülmesini sağlamaktadır. Fiziksel bileşenleri sistematik olarak tanımlayarak tasarım, inşaat ve işletme aşamalarını kapsayan bütüncül bir veri modeli sunar. Mimari, mekanik, elektrik, sıhhi tesisat, HVAC ve altyapı gibi farklı disiplinlerin aynı platformda birlikte çalışabilmesi için ortak bir temel oluşturur [171].

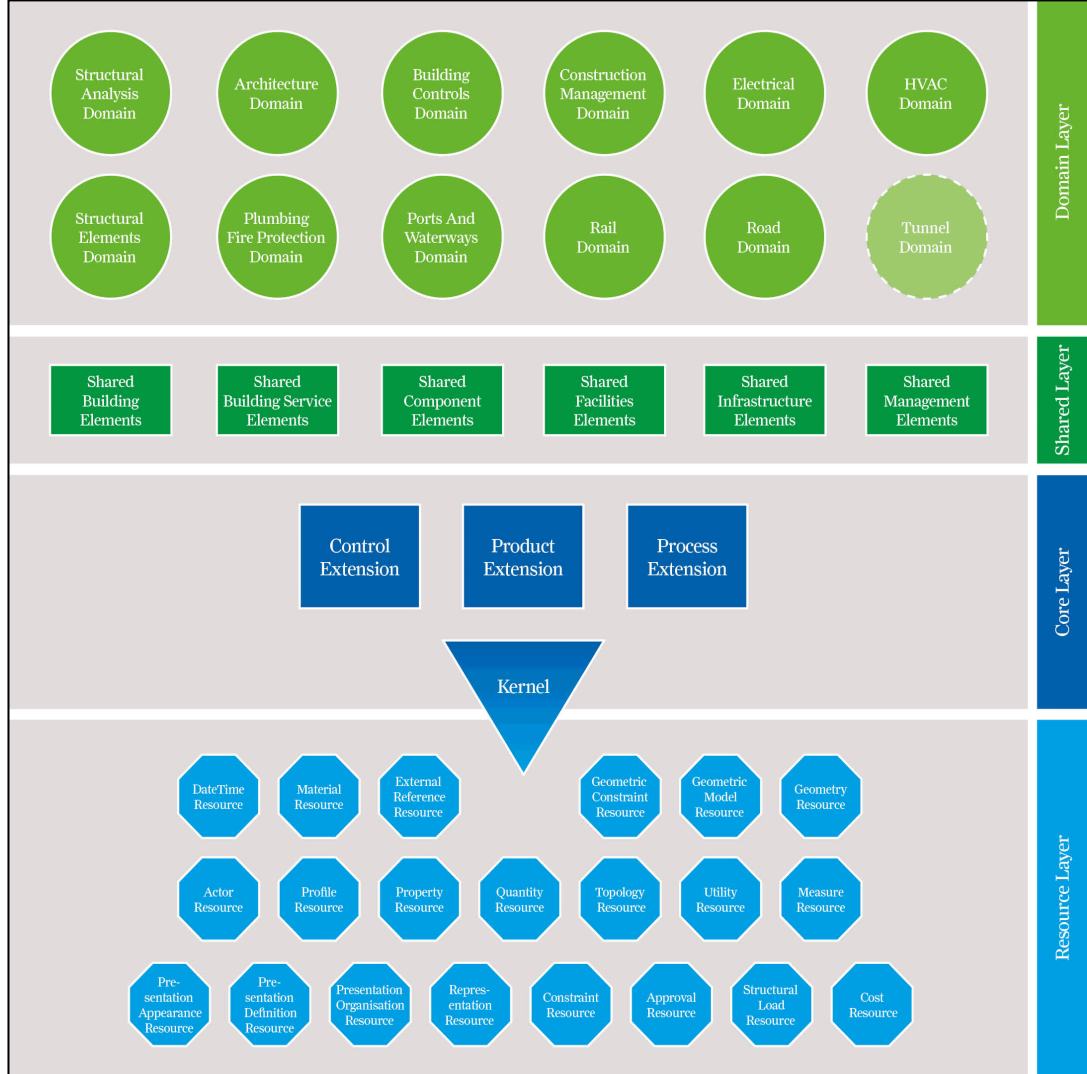
Sektör ihtiyaçlarının zamanla değişmesi, IFC şemasının da düzenli olarak güncellenmesine katkı sağlamıştır [172]. Güncel ve resmi sürüm, ISO 16739-1 standardına uygun biçimde yayımlanan IFC 4.3.2 olup genellikle kısaca IFC 4.3 olarak anılmaktadır. Bunun öncesinde yaygın şekilde kullanılan sürümler arasında IFC 4.0.2.1 (IFC 4) ve IFC 2.3.0.1 (IFC 2x3) yer almakta ve hâlen birçok uygulamada kullanılabilmektedir. IFC 4, dosya tabanlı veri paylaşımıyla yaygın biçimde benimsense de artan model karmaşıklığı, sınırlı esneklik ve çok disiplinli projelerde eşzamanlı çalışmaya uygun olmaması gibi sorunlar taşımaktadır. IFC 5 kapsamını demiryolu, karayolu ve peyzaj gibi alanlara genişleterek daha ayrıntılı veri tanımları, gerçek zamanlı iş birliği ve disiplinler arası koordinasyon için geliştirilmiştir [173].

5.1.1 IFC Veri Modelinin Katmanlı Yapısı ve Temsil Yetenekleri

IFC veri modeli, nesne yönelimli bir yapıya sahiptir. Mimari yapısı sayesinde, bilgi farklı sistemler arasında kolaylıkla aktarılıp yeniden kullanılabılır hâle gelir. Yapı elemanlarından inşaat süreçlerine kadar 700'ün üzerinde nesneyi temsil etmektedir. IFC modeli fiziksel varlıkların (duvar, pencere, kapı gibi) yanında maliyet tahminleri, zaman çizelgeleri ve proje yönetimi unsurları gibi soyut bileşenleri de entegre şekilde tanımlayabilmektedir [174].

IFC veri modeli, genel tanımlardan disiplinlere özgü mesleki detaylara uzanan çok katmanlı bir yapıdır. Şekil 5.1’de de görülebileceği üzere, bu yapı dört temel katmandan oluşur: Kaynak Katmanı (*Resource Layer*), Çekirdek Katman (*Core Layer*), Ortak Katman (*Shared Layer*) ve Alan Katmanı (*Domain Layer*) [169].

Şekil 5.1 IFC 4.3 Şemasındaki Kaynak, Çekirdek, Paylaşılan ve Alan Katmanlarının Gösterimi [175]



En alt düzeyde yer alan Kaynak Katmanı, birim sistemleri, geometri tanımları, tarih ve para birimi gibi AEC sektörüne özgü olmayan temel veri türlerini barındırır. Yapısal yük gibi bazı mühendislik disiplinlerine özgü kavramlar da bu katmanda yer alabilir [175].

Çekirdek katman, IFC veri modelinin iskeletini oluşturan nesne tanımları, özellik kümeleri ve ilişkisel yapıları içerir [175]. Veri modelinin ortak kavramlarını tanımlar ve daha üst katmanlardaki sınıflar için yapısal bir temel oluşturur. Tanımlanan varlıklar, model hiyerarşisindeki diğer tüm öğeler tarafından temel alınabilir ve ihtiyaçlara göre özelleştirilebilir [176]. Katmandaki tüm varlıklar IfcRoot sınıfından türetilir. IfcRoot, her varlığa ait benzersiz kimlik, ad, açıklama ve revizyon kontrolü gibi bilgileri taşır. Dijital modelin taşıyıcı omurgasını oluşturan bu katman, sistemler arası bilgi paylaşımının sağlıklı biçimde yürütülebilmesi açısından merkezi bir rol üstlenmektedir.

Bir üst düzeyde konumlanan “Ortak Katman”, hem fiziksel hem de idari içerikli nesneleri barındıran ara bir yapı sunar [175]. Duvar, pencere, merdiven, zemin kaplaması gibi yapı elemanlarının yanı sıra, izin süreçleri, maliyet tabloları ve kullanıcı tanımları gibi proje yönetimine ilişkin idari varlıkları da içerir. Farklı uzmanlık alanlarının ortaklaşa kullandığı nesne ve ilişki tanımlarını barındırır [177].

En üstte yer alan “Alan Katmanı” ise belirli disiplinlere özgü nesne sınıflarını içerir. Katmanda tanımlanan varlıklar kendi içinde bütünüldür ve başka hiçbir katmandan referans alınamaz [178]. IFC 4.3 sürümü itibarıyla bu katmanda mimarlık, yapı denetimi, inşaat yönetimi, elektrik, mekanik, sıhhi tesisat, liman ve kıyı mühendisliği, demiryolu, karayolu, tünellilik ve yapı mühendisliği gibi çok sayıda uzmanlık alanına özgü nesneler yer almaktadır. Henüz bu kapsama dâhil edilmemiş alanlar için ise buildingSMART bünyesinde tanım geliştirme çalışmaları sürdürölmektedir [175].

IFC modeli, iki ve üç boyutlu geometrik temsillerin nesneleri arasındaki semantik ilişkileri içeren katmanlı bir bilgi yapısı sunar. Böylece farklı BIM yazılımları arasında bilgi kaybı yaşanmadan veri transferi yapılabilir ve sistemler arası entegrasyon daha sorunsuz şekilde gerçekleştirilebilir. IFC aynı zamanda, BIM modellerinin detay seviyesiyle ilişkili olan LOD kavramını da desteklemektedir [171].

IFC, CBS–BIM entegrasyonunda en yaygın kullanılan formatlardan biridir. CityGML gibi CBS odaklı modellere dönüşömlerde geometrik uyum ve semantik bütünlük önemlidir. Entegrasyon süreçlerinde veri aktarımı çoğunlukla IFC’den

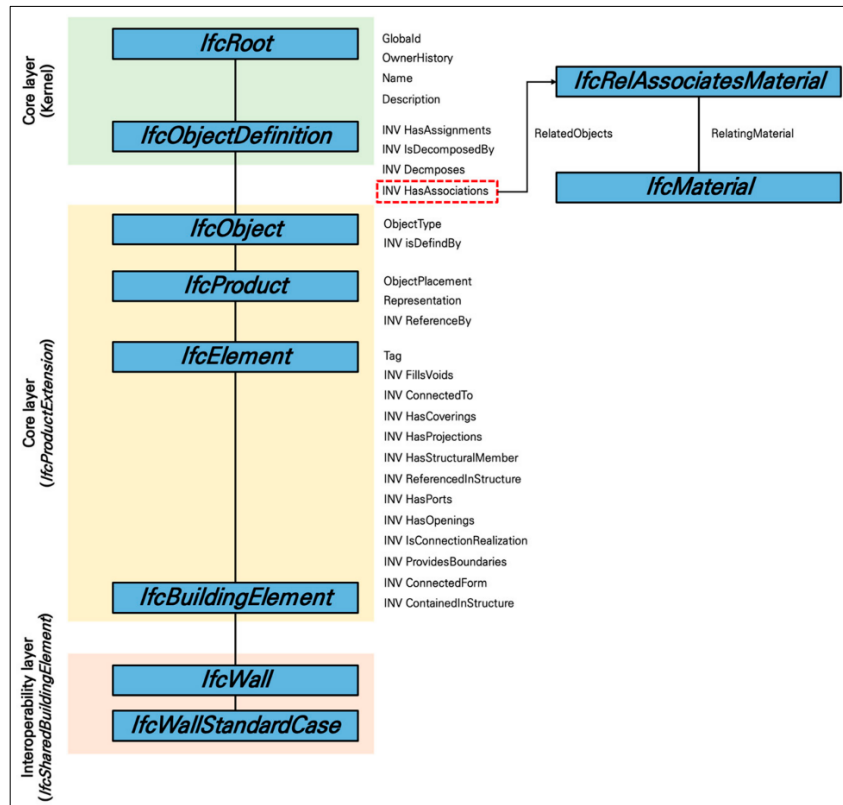
CityGML'e yöneliktir [174]. buildingSMART, yapı yaşam döngüsünün tüm aşamalarında BIM ve CBS ortamları arasında etkili veri paylaşımını sağlamayı amaçlamaktadır. IFG (*Industry Foundation Geospatial*) girişimi, IFC verilerinin GML (*Geography Markup Language*) ile eşleştirilmesini mümkün kılarak yapı temelli bilgilerin coğrafi bilgi sistemlerine entegre edilmesini desteklemektedir [179].

5.1.2 Kalıtım Mekanizması

IFC, nesne yönelimli, açık bir veri standardıdır. Nesne sınıfları, nesneler arası ilişkiler ve nesnelerin özellikleri olmak üzere üç temel yapı taşı üzerine inşa edilmiştir. IFC veri modeli, bina bileşenlerini geometrileri ve semantik öznitelikleriyle tanımlar. Nesneler konum, malzeme, enerji performansı ve maliyet gibi bilgiler içerir. Nesneler arası ilişkiler ise örneğin bir duvarın içindeki boşluğun tanımlanması, bu boşluğun bir pencere ile doldurulması ve pencerenin çerçevesi ya da camı gibi alt bileşenlerle ilişkilendirilmesi üzerinden modellenir [180].

IFC, nesneler arasında kalıtım ilişkileri kurarak hiyerarşik bir yapı oluşturur. Duvar, kapı ve malzeme gibi bileşenler konumları ve bağlantılarıyla izlenebilir. Böylece nesne yönelimli programlama ilkelerine uygun, genişletilebilir ve disiplinler arası etkileşimi destekleyen bir altyapı sunar. Örneğin, sabit kalınlıktaki duvar elemanlarını temsil eden *IfcWallStandardCase* sınıfı, genel duvar tanımı olan *IfcWall* sınıfının özel bir alt türü olarak tanımlanır. Her iki sınıf da *IfcSharedBuildingElements* kümesi içinde yer almakta olup, bu grup yukarı doğru *IfcBuildingElement*, *IfcElement*, *IfcProduct*, *IfcObject*, *IfcObjectDefinition* ve nihayetinde *IfcRoot* sınıfına kadar uzanan bir kalıtım zinciriyle hiyerarşik olarak yapılandırılmıştır. Şekil 5.2'de de gösterilen bu yapı sayesinde, üst sınıflarda tanımlanmış ortak özellikler (örn. nesne kimliği, ad, açıklama veya ilişkisel bağlam) alt sınıflar tarafından doğrudan devralınır ve yeniden tanımlanmaksızın kullanılabilir [171].

Şekil 5.2 IFC Kalıtım Mekanizması [171]



IfcWallStandardCase gibi bir yapı elemanı, malzeme bilgilerini doğrudan kendi üzerinde barındırmaz. Bilgi, Kaynak Katman'da tanımlı *IfcMaterial* sınıfı aracılığıyla ilişkilendirilir ve bu bağlantı *IfcRelAssociatesMaterial* adlı aracı sınıf üzerinden kurulur. İlgili bağlantı ve ilişkiler IFC veri modelinin karakteristik özelliklerinden biri olan “nesnelleştirilmiş ilişki” (*objectified relationship*) yaklaşımını yansıtır. Böylece nesneler arasındaki bağlar doğrudan değil, özel ilişki sınıfları üzerinden kurularak esnek ve daha izlenebilir bir yapı oluşturulur. İlişkiler çift yönlü izlenebilirlik sağlayan ters tanımlar (örn. *HasAssociates*) ile güçlendirilmiştir [171]. Tüm bu varlıklar ve ilişkiler, EXPRESS¹² adı verilen veri tanım diliyle biçimlendirilir.

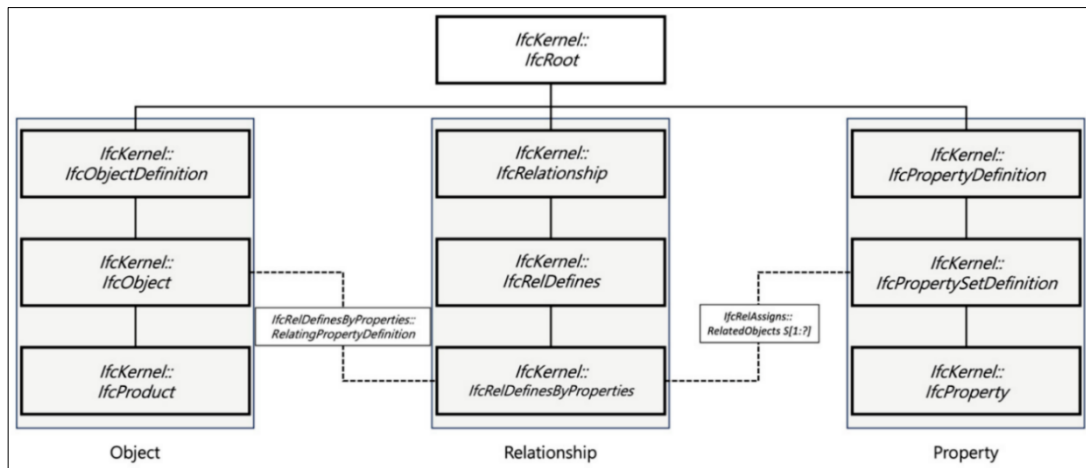
¹² **EXPRESS**, ISO 10303 standardına (STEP) dayalı olarak geliştirilmiş, veri modellerinin biçimsel olarak tanımlanmasını sağlayan bir tanımlama dilidir. IFC şemaları bu dil kullanılarak yapılandırılmıştır.

Yapılar arasındaki ilişkiler ise EXPRESS-G¹³ diyagramları kullanılarak görsel olarak ifade edilir [169].

5.1.3 IFC Kernel Şeması ve Nesneler Arası Hiyerarşik İlişkiler

IfcKernel şeması, IFC veri modelinin en temel ve soyut bileşenlerini tanımlar. Nesne tabanlı modellemenin yapı taşlarını oluşturan bu şema *IfcProduct*, *IfcPropertyDefinition* ve *IfcRelationship* (nesneler, özellikler, ilişkiler) olmak üzere üç üst sınıfa dayanır (Şekil 5.3) [181]. Ortak Katman'da yer alan fiziksel elemanlar *IfcObjectDefinition* ve alt sınıflarıyla, bunlara ait semantik ilişkiler ise *IfcRelationship* alt türleriyle tanımlanır. Böylece BIM yazılımlarında fiziksel elemanlar, nitelikleri ve ilişkileri bu şema üzerinden modellenir [171].

Şekil 5.3 IfcKernel Sınıf Hiyerarşisinin Gösterimi [171]

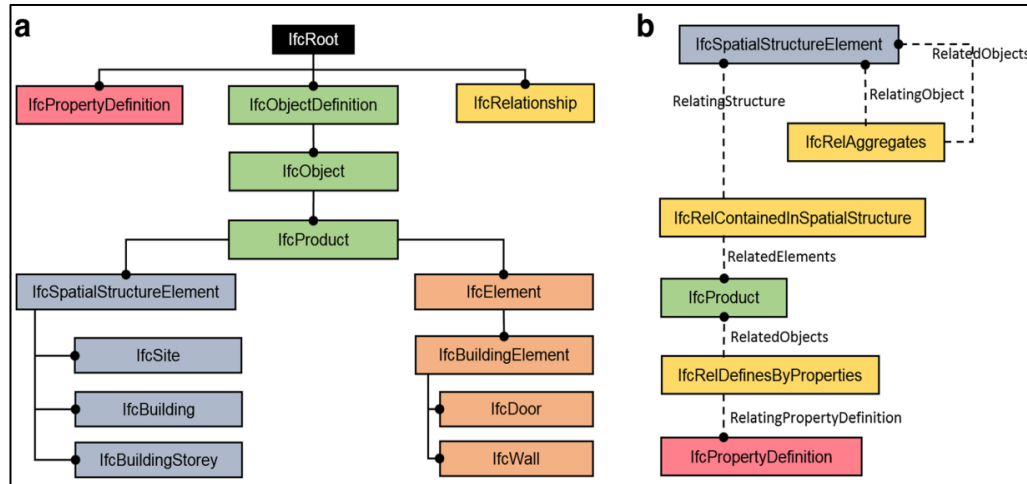


Şekil 5.4, IFC veri modelinin temel bileşenlerini ve bu bileşenler arasındaki ilişkileri görsel olarak özetlemektedir. Sol tarafta yer alan (a) bölümü, IFC'nin nesne yönelimli yapısını göstermektedir. En üst düzeyde konumlanan *IfcRoot* sınıfı, modeldeki tüm varlıkların türediği ortak üst yapıyı temsil eder. Bu yapının altında yer alan *IfcProduct* sınıfı, iki ana gruba ayrılır: mekânsal düzenlemeleri tanımlayan *IfcSpatialStructureElement* ve fiziksel yapı bileşenlerini temsil eden *IfcElement* [171]. Mekânsal yapılar (*IfcSite*, *IfcBuilding*, *IfcBuildingStorey* gibi) binanın katmanlı

¹³ **EXPRESS-G**, EXPRESS dilinde tanımlanan veri modellerinin grafiksel temsiline olanak tanıyan diyagram biçimidir. Sınıflar, öznelitlikler ve aralarındaki ilişkiler görsel olarak ifade edilir. Bu sayede model yapısı daha kolay anlaşılır.

mekânsal hiyerarşisini düzenlemek için kullanılır. *IfcWall* veya *IfcDoor* gibi fiziksel elemanlar ise geometrik temsile sahip olmak zorundadır [182].

Şekil 5.4 Express-G Gösterimiyle IFC Hiyerarşisinin Temel Yapısı (a) ve İlişkisel Atamaları (b) [182]

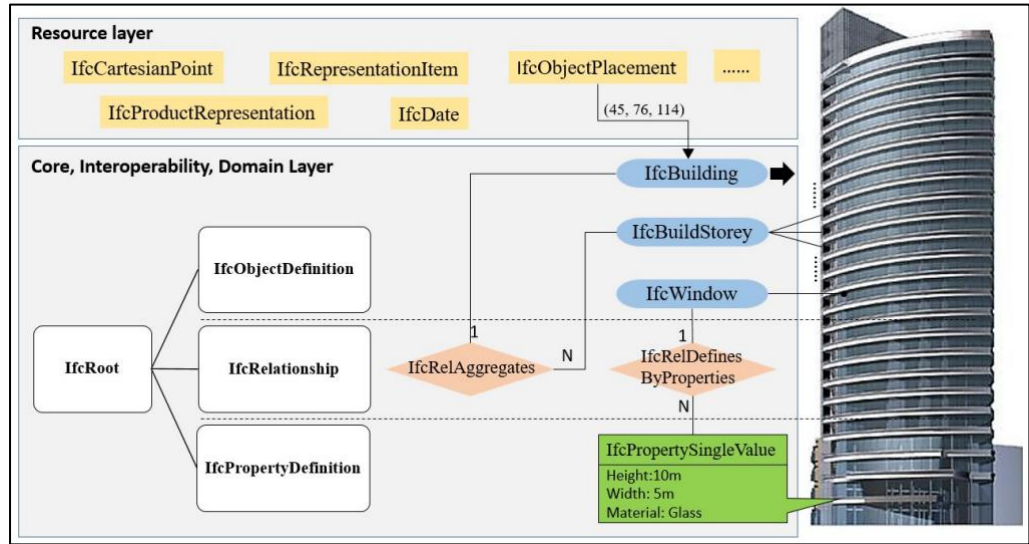


Şeklin sağ tarafındaki (b) bölümü, nesneler arasındaki ilişki yapılarını göstermektedir. *IfcRelationship* sınıfı altında tanımlanan nesnelleştirilmiş ilişkiler sayesinde, yapı elemanları ile mekânsal yapılar arasında açık ve tekrar kullanılabilir bağlar kurulabilir. Örneğin, *IfcRelAggregates* bir yapının daha küçük bileşenlere ayrılmasını, *IfcRelContainedInSpatialStructure* elemanların belirli bir mekânsal yapı içinde konumlandırılmasını sağlar [171]. *IfcRelDefinesByProperties* ise bir varlığın sahip olduğu özellik kümeleriyle bağlantısını tanımlar. IFC veri modeli bu yapılar ile hem fiziksel hem de semantik bilgileri entegre etmiş bir sistem olarak tutarlı ve okunabilir biçimde sunar [182].

Bir başka örnek olarak Şekil 5.5’de gösterildiği gibi *IfcRoot* sınıfı, IFC veri modelinin en üst düzey varlığı olarak tüm nesnelere kimlik, sahiplik ve zaman damgası gibi temel meta verileri sağlar. *IfcRoot* sınıfından türeyen *IfcObjectDefinition*, fiziksel (duvar, kapı) ve kavramsal varlıkların (*IfcType*, *PropertySet*) genel tanımlarını içeren bir üst sınıftır. *IfcRelationship*, modeldeki nesneler arasındaki bağlantıları tanımlar. Örneğin bir bileşenin hangi kata ait olduğunu veya bir pencerenin hangi duvarda yer aldığını bu yapı aracılığıyla belirlemek mümkündür. *IfcPropertyDefinition* ise nesnelere ait yükseklik, malzeme gibi özellikleri tanımlayan yapıların temelidir. Şekil,

IfcBuilding, *IfcBuildingStorey* ve *IfcWindow* gibi fiziksel bileşenlerin nasıl hiyerarşik olarak yapılandırıldığı bu varlıklara ait "Yükseklik: 10m, Malzeme: Cam" gibi bilgilerin *IfcPropertySingleValue* üzerinden nasıl ilişkilendirildiği açıkça gösterilmektedir [183].

Şekil 5.5 IFC Modelindeki Bir Binanın İlişkisel Gösterimi [183]



5.1.4 Semantik İlişkilerin Tanımlanması

IFC’de semantik kavramı, geometrik şekillerin tanımlanmasını ve bu nesnelerin ne olduğunu, hangi işlevi üstlendiğini ve diğer öğelerle nasıl ilişkili olduğunu ifade eder. IFC veri modelinde semantik bilgi nesne sınıfları, bu sınıflara ait öznitelikler ve nesneler arasındaki ilişkiler üzerinden tanımlanır [184]. Modelde her varlık belirli bir sınıf altında organize edilir ve bu sınıflar, kök sınıftan türeyen hiyerarşik bir yapı oluşturur. Yapının işlevsel bileşenleri (örneğin kolon, kiriş, duvar) *IfcBuildingElement* gibi üst sınıflar altında toplanırken, havalandırma veya sıhhi tesisat gibi MEP sistemlerine ait parçalar kendi alt sınıflarıyla temsil edilir. Özel bir işlevi olmayan ya da tanımı belirsiz elemanlar için *IfcBuildingElementProxy* veya *IfcProxy*¹⁴ gibi daha genel sınıflar kullanılır. *IfcProxy* esnek tanımlar modellemede kolaylık sağlasa da standart analiz süreçlerini zorlaştırabilmektedir [185, 186].

¹⁴ **IfcProxy**, geometrik bir temsili ve yerleşimi olabilen veya olmayan nesneleri sarmak için bir tür kapsayıcı olarak tasarlanmıştır.

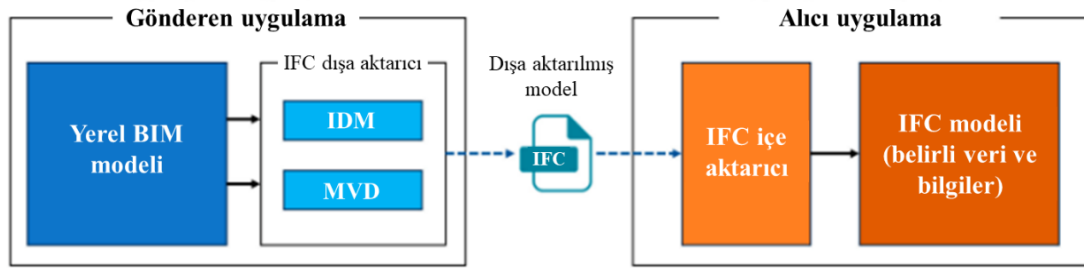
IFC’de semantik ilişkiler, mekânsal organizasyon ile de tanımlanabilir. *IfcSpatialStructureElement* sınıfı üzerinden kurgulanan mekânsal yapı “Arsa (*Site*) → Bina (*Building*) → Kat (*Building Storey*) → Mekân (*Space*) → Bölge (*Zone*)” biçiminde kademeli olarak ilerler. Böylece yapı elemanları ait oldukları mekânsal kapsayıcılarla ilişkilendirilerek bütüncül bir topoloji oluşturulur [184].

IFC modeli içinde nesneler arası doğrudan bağlantılar da kurulabilir. Örneğin duvarların birbirine bağlanma biçimi, mekânsal alanların sınırları veya bir nesnenin malzeme ve kullanım bilgisi bu ilişkiler aracılığıyla ifade edilir. Örneğin, bir duvarın komşu duvarla birleşme biçimi *IfcRelConnectsElements* ile, bir odanın sınırlarının hangi duvarlardan oluştuğu *IfcRelSpaceBoundary* ile, o duvarın beton malzemeden yapılmış olması ise *IfcRelAssociatesMaterial* ile gösterilir. Özellik kümeleri (*Property Sets*) de semantik bilginin önemli bir parçasıdır. IFC’de bunlar *IfcPropertySet* sınıfı altında tanımlanır ve *IfcRelDefinesByProperties* ilişkisiyle yapı elemanlarına bağlanır. Örneğin, *Pset_BuildingUse* özelliği bir binanın konut ya da ticari amaçla kullanıldığını belirtmek için kullanılabilir. Çoğu özellik kalıtım yoluyla üst sınıflardan alt sınıflara aktarılır ve modeldeki semantik bütünlük sağlanır [185, 186].

5.1.5 Veri Aktarımında IDM ve MVD Yaklaşımı

Uygulamada, IFC şemasının tamamı nadiren kullanılır. Genellikle bir BIM yazılımında üretilen modeldeki verilerden yalnızca ihtiyaç duyulan kısımlar yazılıma aktarılır. Bu tür sınırlı veri alışverişi senaryolarında, bilgi paylaşım sürecinin açık şekilde tanımlanması ve standardize edilmesi amacıyla iki temel yapıdan yararlanılır: Bilgi Teslim Kılavuzu (*Information Delivery Manual, IDM*) ve MVD (Şekil 5.6) [181].

Şekil 5.6 IDM ve MVD ile IFC Verilerinin Aktarımının Gösterilmesi [171]



IDM, bir inşaat projesinin farklı aşamalarında hangi bilginin, kim tarafından, ne zaman ve hangi amaçla üretileceğini sistematik olarak belirlemeye yönelik bir yöntemdir. IFC'nin kapsamlı ve karmaşık yapısını daha yönetilebilir, bağlantılı parçalara ayırarak kavranmasını kolaylaştırır ve pratikte uygulanabilirliğini artırır. IDM, paydaşlar arası bilgi akışını sadeleştirir, veri tekrarlarını azaltır ve modellemedeki hataları en aza indirir [187].

MVD ise, bilgi alışverişinin amacına göre IFC sınıflarını, özelliklerini ve ilişkilerini tanımlayan teknik çerçevedir. Her MVD, bir ya da daha fazla IDM senaryosuna karşılık gelecek şekilde yapılandırılır. Böylece amaca özel bir IFC alt modeli oluşturularak farklı yazılımlar arasında bilgi uyumu sağlanır. Kısaca, birlikte çalışabilirliği güçlendirir ve veri aktarımındaki doğruluğu güvence altına alır [188].

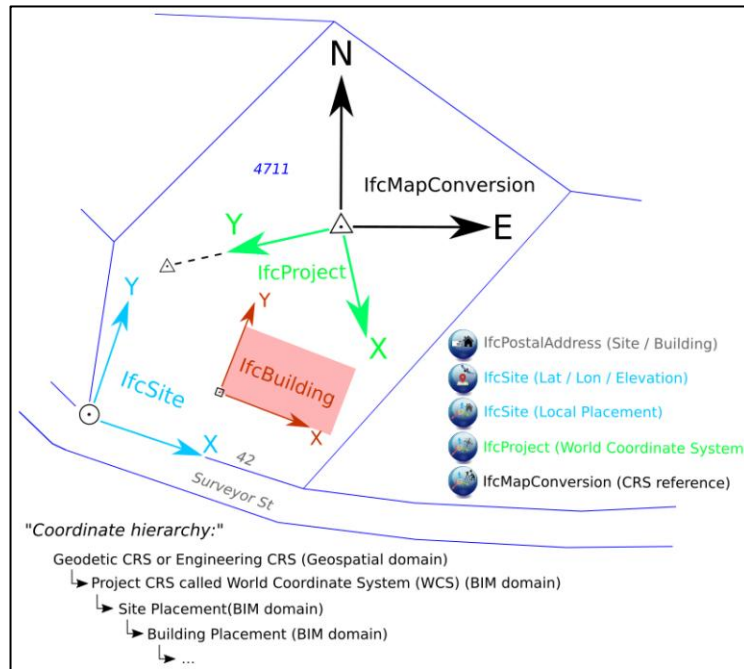
5.1.6 IFC’de Konumsal Referanslama ve Koordinat Sistemleri

BIM ve CAD ortamlarında, yapı bileşenleri çoğunlukla birbirinden bağımsız şekilde modellenir ve daha sonra bütünleşik bir yapıya entegre edilir. IFC veri modelinde her nesne kartezyan koordinatlarla tanımlanan yerel koordinat sistemiyle tanımlanır. Tüm bu yerel sistemler en sonunda proje tabanlı tek bir koordinat sisteminde birleştirilir. Ancak bu sistem coğrafi referanslı değildir. Modeli gerçek dünya koordinatlarıyla eşleştirebilmek için *IfcMapConversion* gibi ek tanımların yapılması gerekir [185].

Uygulamada bu durum, her bir elemanın konumunun, belirli bir hiyerarşi içerisinde tanımlanan başka bir yapı ögesine göre belirlendiği anlamına gelir. Örneğin, bir proje modeli arsa (*IfcSite*), bina (*IfcBuilding*), kat (*IfcBuildingStorey*) gibi mekânsal düzeylerden oluşan bir organizasyon yapısıyla ve nesneler arası ilişkiler yoluyla hiyerarşik olarak düzenlenebilir. IFC veri modelinde geometrik temsile sahip bir nesne, *IfcProduct* sınıfı altında tanımlanır ve bu temsil *IfcProductRepresentation* aracılığıyla ifade edilir. Nesnenin yerel konumu ise *IfcObjectPlacement* sınıfı üzerinden belirlenir. Konumlandırma ya projeye ait koordinat sistemine ya da başka bir nesneye göre görel olarak yapılır [185].

IFC, coğrafi referans bilgisinin modellenmesine yönelik olarak adres tabanlı tanımlamalardan başlayarak, başlangıç noktası koordinatları ve yönelim bilgilerini içeren daha gelişmiş yapılandırmalara kadar farklı seviyelerde seçenekler sunar. Ek olarak *IfcSite* ve *IfcProject* varlıkları enlem, boylam ve yükseklik bilgilerini barındırabilirken, yapının açık adres bilgisi *IfcPostalAddress* sınıfı aracılığıyla modele dâhil edilebilir. Şekil 5.7’de bu yapının genel görünümü sunulmakta *IfcMapConversion* öğesinin, modelin gerçek dünya ile bağlantısını nasıl kurduğu görsel olarak ifade edilmektedir [189].

Şekil 5.7 IFC'de Coğrafi Referanslama Hiyerarşisi [189]



IFC veri modeli, yapıların coğrafi konumlarını tanımlarken çok katmanlı ve hiyerarşik bir koordinat sistemi kullanır. Yapı, en üst düzeydeki *IfcProject* nesnesiyle başlar ve projenin ait olduğu coğrafi koordinat sistemine göre konumunu tanımlar. Tanımlama aşamasında, yerel BIM koordinatlarının gerçek coğrafi referans sistemine nasıl dönüştürüleceği, *IfcMapConversion* sınıfı üzerinden belirlenir. Dönüşüm ölçek, yön, öteleme ve dönüş gibi parametreleri içerir ve genellikle EPSG kodlarıyla coğrafi referans sistemine bağlanır. Yerleşim hiyerarşisinin alt kademelerinde yer alan *IfcSite*, *IfcBuilding* ve *IfcBuildingStorey* gibi varlıklar, kendi yerel koordinat sistemleriyle tanımlanır. Her bir konum düzeyi, bir üst yapıya göre yerleştirilerek mekânsal

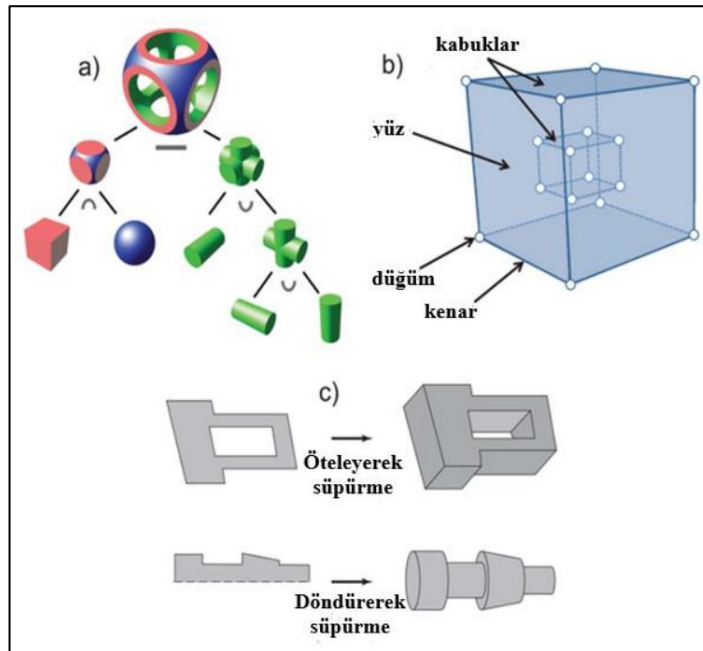
bütünlük sağlanır. Örneğin, bir bina *IfcSite*'a göre, kat planları ise doğrudan binaya göre konumlandırılır (Şekil 5.7) [189].

Konumsal doğruluk, tasarımdan inşaat ve işletmeye kadar tüm yaşam döngüsünde kritik öneme sahiptir. En az bir koordinat sisteminin jeodezik datumla ilişkilendirilmesi halinde dönüşüm gerekir ve geometrik veriler ortak bir referans sisteminde modellenmelidir [190]. Bu konu ilerideki koordinat sistemi dönüşümü başlığı altında daha detaylı işlenecektir.

5.1.7 IFC Modelinde 3B Geometrik Temsil Teknikleri

IFC veri modelinde 3B nesneleri dijital ortamda temsil etmek için B-Rep (*Boundary Representation*), CSG (*Constructive Solid Geometry*) ve SS (*Swept Solid*) modelleme tekniklerinden yararlanır (Şekil 5.8). B-Rep yöntemi, nesneleri dış yüzeyleriyle tanımlar ve özellikle karmaşık detaylara sahip öğelerde (örneğin pencere ya da kapılarda) tercih edilir. CSG, yaklaşımı ise temel geometrik şekillerin (örn. küre, silindir, koni) birleştirilmesi, kesilmesi ya da birbirinden çıkarılması gibi işlemlerle daha karmaşık yapılar oluşturur. SS temelli modelleme ise bir 2B profilin belirli bir eksen boyunca hareket ettirilmesiyle 3B geometrinin oluşturulmasını sağlar [186].

Şekil 5.8 (a) CSG (b) B-rep (c) SS 3B Katı Model Örneğinin Gösterimi [186]



Bahsedilen modelleme teknikleri, IFC içerisinde tek başına kullanılabildiği gibi birden fazla yöntemin birlikte çalıştığı hiyerarşik yapılarda da uygulanabilir. Ayrıca geometrik boşlukların tanımlanması açısından *IfcOpening* ve *IfcSpace* gibi sınıflar önemli bir rol oynar. Örneğin *IfcOpening*, bir duvarda pencere açıklığını veya bir döşemede merdiven boşluğunu temsil edebilir [186].

5.1.8 IFC Dosya Formatlarının İçeriği ve Bileşenleri

Şekil 5.9 IFC Dosya Yapısını Gösteren Bir Kesit

```
ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION(('ViewDefinition [CoordinationView_V2.0]','RevitIdent
FILE_NAME('sample.ifc','2025-01-17T12:59:48+03:00',''),(''),'ODA SDA
FILE_SCHEMA(('IFC2X3'));
ENDSEC;

DATA;
#1=IFCORGANIZATION($,'Autodesk Revit 2024 (ENU)',$,,$,$);
#2=IFCAPPLICATION(#1,'2024','Autodesk Revit 2024 (ENU)','Revit');
#3=IFCCARTESIANPOINT((0.,0.,0.));
#4=IFCCARTESIANPOINT((0.,0.,0.));
#5=IFCDIRECTION((1.,0.,0.));
#6=IFCDIRECTION((-1.,0.,0.));
#7=IFCDIRECTION((0.,1.,0.));
#8=IFCDIRECTION((0.,-1.,0.));
#9=IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#10=IFCDIRECTION((0.,0.,-1.));
#11=IFCDIRECTION((1.,0.,0.));
#12=IFCDIRECTION((-1.,0.,0.));
#13=IFCDIRECTION((0.,1.,0.));
#14=IFCDIRECTION((0.,-1.,0.));
#16=IFCORGANIZATION($,' ',' ',$,,$);
#17=IFCPERSONANDORGANIZATION(#15,#16,$);
```

IFC dosya yapısı, üç temel bileşenden oluşur. İlk olarak, modelin üretildiği yazılım, versiyon bilgisi ve genel meta verilerin yer aldığı başlık bölümü (*header*), ardından tüm fiziksel ve anlamsal model içeriğini içeren veri bloğu (*data section*), son olarak ise dosyanın bütünlüğünü ve kapanışını belirten bitiş etiketi (*end section*) bulunur. Veri bloğundaki her satır, özgün bir kimlik numarası (*#id*), ait olduğu IFC sınıfı (örneğin *IfcWall*, *IfcWindow*) ve bu nesneye ait özelliklerin sıralandığı bir öznitelik kümesini içerir (Şekil 5.9) [180]. Dosya yapısı ile makine tarafından kolayca işlenip farklı yazılımlar arasında veri bütünlüğü korunarak paylaşılabilmesi mümkün olmaktadır [171].

5.2 CityGML Standartı ve Veri Yapısının İncelenmesi

CityGML, üç boyutlu şehir modellerinin nesne temelli olarak tanımlanmasına semantik, geometrik, topolojik ve görünüme ilişkin bilgilerin birlikte temsil edilmesine olanak tanıyan, Açık Mekansal Konsorsiyum (*Open Geospatial Consortium, OGC*) tarafından geliştirilmiş açık bir veri standardıdır. [191]. Binalar, köprüler, tüneller, ulaşım altyapıları, kentsel mobilyalar, su yüzeyleri ve bitki örtüsü gibi pek çok kentsel nesne için semantik, geometrik ve topolojik özniteliklerle zenginleştirilmiş kavramsal bir şema sunar [192].

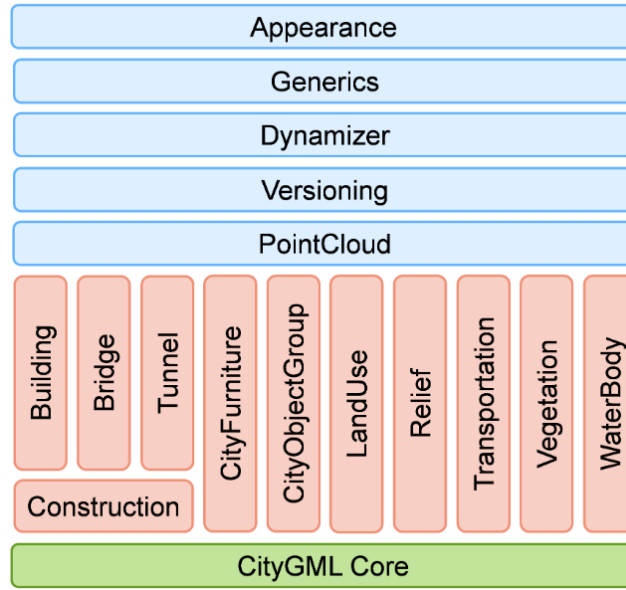
CityGML'in en önemli avantajlarından biri, kentsel alanları enerji tüketimi, ulaşım, hava kalitesi ve şehir planlaması gibi çeşitli analizler için de modelleyebilmesidir [193]. CityGML 3.0 sürümüyle beraber yapı daha da genişletilerek IFC, IndoorGML, Arazi İdaresi Temel Modeli (*Land Administration Domain Model, LADM*) ve INSPIRE gibi diğer uluslararası standartlarla birlikte çalışabilirlik düzeyi artırılmıştır [194]. Ayrıca bu sürüm, semantik web teknolojileriyle daha güçlü entegrasyon yetenekleri sunarak veri paylaşımı ve yorumlanabilirlik açısından önemli ilerlemeler sağlamıştır.

5.2.1. Modüler Yapısı

CityGML 3.0, kavramsal model yapısını modüler bir mimari üzerine kurmuştur. Modelin temelini oluşturan Çekirdek (*Core*) Modül ile kentsel varlıkları ayrıntılı şekilde tanımlayan Tematik Uzantı Modülleri'dir. Şekil 5.10'da da görüldüğü üzere, yeşil renkle gösterilen Çekirdek Modül'dür. Geometrik, topolojik ve semantik yapıların genel tanımlarını barındıran bu modül, CityGML uyumlu her sistem tarafından mutlaka desteklenmesi gereken ortak bir referans katmanıdır [194].

Şekil 5.10'da gösterildiği üzere dikey kutular farklı tematik modülleri, yatay modüller ise tüm tematik modüller için geçerli olan kavramları göstermektedir. Kırmızı renk ile gösterilen tematik modüller; şehirdeki bina, köprü, tünel, ulaşım altyapısı, bitki örtüsü, su yüzeyleri, şehir mobilyaları, arazi kullanımı, arazi rölyefi, inşaat faaliyetleri ve kentsel nesne grupları farklı bileşenlerin ayrıntılı bir biçimde modellenmesini mümkün kılar.

Şekil 5.10 CityGML 3.0 Modüllerinin Genel Görünümü [194]



CityGML 3.0 sürümüyle birlikte, bu tematik katmanlara ek olarak farklı işlevsel ihtiyaçlara yanıt verecek şekilde yapılandırılmış beş ayrı yardımcı modül tanımlanmıştır. Amaç, modelleme esnekliğini artırarak daha geniş kullanım senaryolarını desteklemektir. Şekil 5.10’da mavi renk ile gösterilen bu modüllerin açıklamaları aşağıda verilmiştir [194].

- **Appearance (Görünüm)**, Nesnelerin renk, doku gibi görsel özelliklerini tanımlamak için kullanılır [194].
- **PointCloud (Nokta Bulutu)**, Fiziksel nesnelerin geometrisinin nokta bulutu verisiyle ifade edilmesini sağlar [194].
- **Generics (Genel)**, Standartta doğrudan karşılığı olmayan özel nesne ve ilişkilerin modellenmesine imkân tanır [194].
- **Versioning (Sürümlleme)**, Nesnelerin zaman içerisindeki değişimlerini ve bu değişimlerin nedenlerini temsil eder [194].
- **Dynamizer**, Sensör verileri veya enerji tüketimi gibi zaman serisi verilerinin şehir nesneleriyle ilişkilendirilmesini mümkün kılar [194].

CityGML’in modüler yapısı, geliştiricilere yalnızca ihtiyaç duyulan modülleri kullanarak uygulamalar geliştirme imkânı sunar. Örneğin yalnızca bina odaklı bir

sistemde *Core*, *Construction* ve *Building* modülleri yeterlidir. Kullanılmayacak bileşenler ise boş eşlemeyle dışlanabilir, böylece özelleştirme ve esneklik sağlanır.

5.2.2 ADE Mekanizması ve Tematik Uyarlamalar

Uygulama Alanı Uzantısı (*Application Domain Extension, ADE*), CityGML veri modelini özgün kullanım senaryolarına uyarlamak ve modelin anlamsal bütünlüğünü koruyarak yeni sınıflar ile öznelilikler eklemek amacıyla geliştirilmiş bir genişletme mekanizmasıdır. CityGML'in modüler yapısı, belirli tematik alanlara özgü gereksinimlerin karşılanmasına olanak tanır ve ADE'ler bu doğrultuda geliştirilen özel eklentiler olarak kullanılabilir. Kullanıcılar mevcut modele yeni kavramsal varlıklar, nitelikler veya ilişkiler ekleyerek standart veri yapısını zenginleştirebilir. Literatürde farklı alanlara yönelik çok sayıda ADE örneği yer almaktadır. Öne çıkanlar arasında; gürültü haritalama (*Noise ADE*), enerji verimliliği ve bina performansı (*Energy ADE*), 3B kadastro uygulamaları (*Cadastral ADE*), vergi modelleme (*Taxation ADE*), afet yönetimi (*Disaster Management ADE*) ve kentsel planlama (*Urban Planning ADE*) gibi uygulamalar bulunmaktadır [195].

5.2.3 Geometrik Yapısı

CityGML'de üç boyutlu nesnelerin geometrisi genellikle B-Rep yöntemiyle tanımlanır. B-Rep temsilindeki bir nesne, onu çevreleyen yüzeylerin birleşimiyle oluşturulur. Örneğin bir bina çatı, dış duvarlar ve taban yüzeylerinin bir araya gelmesiyle hacim kazanır. Gerektiğinde iç boşlukları göstermek üzere iç yüzeyler de tanımlanabilir. CityGML'de bu tür yüzeyler genellikle “*Surface*” terimiyle ifade edilir ve çoğunlukla çokgen (*polygon*) biçiminde modellenir [196, 197].

İki ve üç boyutlu geometri türlerinin modellenmesi sadeleştirilmiş yapılar ile olur. Tüm yüzey tabanlı geometriler, çokgenler olarak tanımlanır ve ihtiyaç doğrultusunda *MultiSurface*, *CompositeSurface*, *TriangulatedSurface* gibi yapılar hâlinde birleştirilir. Hacimsel nesneler için ise bu yüzeyler *Solid*, *MultiSolid* ya da *CompositeSolid* gibi üst düzey geometrik yapıların bileşeni olarak kullanılır [198].

CityGML daha büyük ve karmaşık yapıları tanımlamak için Birleşik (*aggregate*) ve Bileşik (*composite*) geometri türlerini de destekler. Birleşik

geometriler, birbirine temas edebilen, çakışabilen veya tamamen ayrı duran parçalardan oluşur. Bileşik geometriler aynı türden geometrilerin sadece sınırlarından temas etmesine izin verir. Çakışmaları ya da iç içe geçmeleri mümkün değildir. Yalnızca aynı boyuttaki bileşenleri içerebilir ve bu bileşenler hem ayrık olmalı hem de topolojik olarak sınırları boyunca düzgün biçimde birbirine bağlanmalıdır. İki geometri türü arasındaki fark, özellikle büyük ölçekli kent modellerinde geometrik tutarlılığın sağlanması açısından kritik önem taşır [196-198].

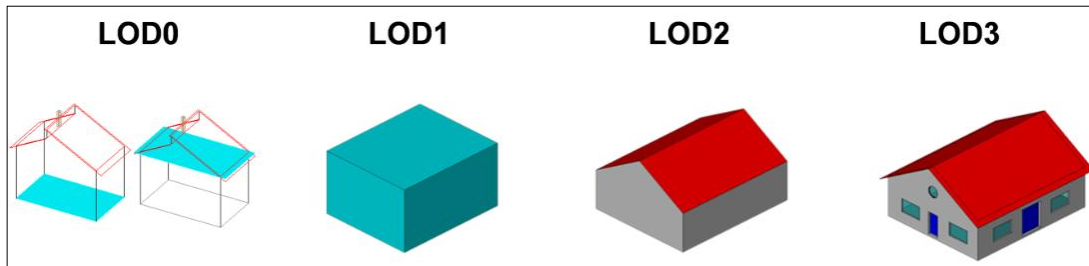
5.2.4 Konumsal Bilgiler

CityGML, tüm geometrik öğeleri üç boyutlu (x, y, z) koordinatlarla tanımlar ve bu koordinatlar daima bir Koordinat Referans Sistemi ile ilişkilendirilmelidir. Diğer CAD veya BIM sistemlerinden farklı olarak, CityGML'deki her nokta mutlak coğrafi konuma sahiptir. Yani doğrudan dünya üzerindeki gerçek bir lokasyona karşılık gelir. Modelin araziyle ilişkilendirilmiş olması, farklı kurumlardan gelen coğrafi verilerle uyumlu şekilde kullanılabilmesini ve şehir ölçeğinde bütünsel bir modelin oluşturulmasını mümkün kılar [194].

5.2.5 Detay Seviyeleri (LoD)

CityGML, şehir nesnelerini geometrik ve semantik açıdan farklı detay seviyelerinde tanımlayan dört basamaklı bir LoD yapısı sunar (Şekil 5.11). CityGML 3.0 sürümünde tüm nesneler, dış cephe öğeleriyle birlikte iç mekân bileşenlerini de kapsayacak şekilde LoD0'dan LoD3'e kadar modellenebilir. Önceki sürümlerde yalnızca iç mekânlar için ayrılmış olan LoD4 seviyesi ise kaldırılmış, bunun yerine iç ve dış alanlar tek bir bütüncül modelleme yapısı içinde birleştirilmiştir [194].

Şekil 5.11 Bina nesnesinin ayrıntı düzeylerinin CityGML 3.0 ile gösterimi [194]



LoD0: Gerçek dünya nesnelerinin izdüşüm geometrileriyle temsil edildiği en sade düzeydir. Binalar tek bir nokta, çizgi ya da yüzeyle gösterilebilir. Genellikle kat planları, bina ayak izleri veya çatı izdüşümleri bu seviyeye girer. Harita temelli gösterimler, genelleştirilmiş görselleştirme ve temel analizler için uygundur [194].

LoD1: Nesneler, 2B ayak izlerinin dikey olarak uzatılmasıyla oluşan prizmatik bloklar şeklinde temsil edilir. Binalar hacim kazanır ancak çatı formu ve cephe detayları yer almaz. Genel kentsel görselleştirme, hacim analizi gibi uygulamalarda kullanılır [194].

LoD2: Binalar, genel çatı formları ve dış duvar yüzeyleri gibi geometrik detaylarla zenginleştirilir. Mimari çıkıntılar, cephe eğimleri gibi unsurlar modele dâhil edilir. Pencere, kapı gibi detaylar genellikle bulunmaz. Enerji analizleri, gölge hesaplamaları gibi uygulamalar için uygundur [194].

LoD3: En yüksek detay seviyesidir. Gerçek bina geometrileri, kapı, pencere, balkon gibi tüm mimari öğeleriyle birlikte ayrıntılı olarak temsil edilir. Gerçekçi görselleştirme, mimari analiz ve bina içi/dışı detaylı planlamalar için kullanılır [194].

5.2.6 Bina Bileşenlerinin Modellemesi

Şekil 5.12’de görülen UML diyagramı, CityGML 3.0’ın bina modelleme yaklaşımının kavramsal temelini ayrıntılı şekilde ortaya koymakta, aynı zamanda BIM tabanlı verilerin bu modele daha etkili biçimde entegre edilebilmesine imkân tanımaktadır [194]. Hacimsel yapı elemanları, *RoofSurface* ya da *WallSurface* gibi tematik yüzey sınıflarıyla sınırlanmakta ve ayrıca mekân ve mekân sınırı (*space* ve *space boundary*) kavramları aracılığıyla aralarındaki anlamsal ilişkiler açık biçimde tanımlanmaktadır. Modelin bina içi ayrımlarının daha ayrıntılı şekilde ifade edebilmesi için, *AbstractBuildingSubdivision* adında yeni bir üst sınıf geliştirilmiş ve bunun altına *BuildingUnit* (örn. bir daire) ve *Storey* (kat) gibi alt sınıflar yerleştirilmiştir. Öte yandan, pencere ve kapı gibi yapı öğeleri artık *Window* ve *Door* sınıflarıyla hacimsel olarak tanımlanırken, bunlara karşılık gelen yüzey bileşenleri de *WindowSurface* ve *DoorSurface* gibi ayrı sınıflarda temsil edilmektedir [193].

GML geometrilerinin aynı nesneyi farklı şekillerde ifade edebilmesi, veri ayrıştırma işlemlerini daha karmaşık hâle getirir. Birlikte çalışabilirlik açısından da bazı zorluklar olabilir çünkü her uygulama bu farklı temsilleri aynı şekilde yorumlayamayabilir. Veri boyutları da önemli bir başka konudur. Detay seviyesi yüksek olan CityGML dosyaları çoğu zaman büyük hacimli olur. Bu da web tabanlı servislerde performans optimizasyonu ihtiyacını kaçınılmaz kılar [196].

Şekil 5.13'ün sağ tarafında yer alan örnek, “gml” uzantılı etiketlerin yoğun biçimde kullanılması ve iç içe geçmiş katmanlı yapı “XML/GML” sistematığının nasıl çalıştığını açık biçimde yansıtmaktadır.

Şekil 5.13 CityJSON(a) ve CityGML(b) kodlama örnekleri

```

{
  "CityModel": {
    "cityObjectMember": {
      "Building": {
        "boundedBy": {
          "Envelope": {
            "srsName": "urn:ogc:def:crs:EPSG::4326",
            "lowerCorner": "34.0 56.0",
            "upperCorner": "35.0 57.0"
          }
        },
        "location": {
          "Point": {
            "srsName": "urn:ogc:def:crs:EPSG::4326",
            "pos": "34.5 56.5"
          }
        }
      }
    },
    "class": "Residential",
    "function": "Living",
    "yearOfConstruction": 2001,
    "measuredHeight": {
      "uom": "m",
      "value": 12.5
    }
  }
}

```

a)

```

<CityModel xmlns="http://www.opengis.net/citygml/2.0">
  <cityObjectMember>
    <Building>
      <gml:boundedBy>
        <gml:Envelope srsName="urn:ogc:def:crs:EPSG::4326">
          <gml:lowerCorner>34.0 56.0</gml:lowerCorner>
          <gml:upperCorner>35.0 57.0</gml:upperCorner>
        </gml:Envelope>
      </gml:boundedBy>
      <gml:location>
        <gml:Point srsName="urn:ogc:def:crs:EPSG::4326">
          <gml:pos>34.5 56.5</gml:pos>
        </gml:Point>
      </gml:location>
      <class>Residential</class>
      <function>Living</function>
      <yearOfConstruction>2001</yearOfConstruction>
      <measuredHeight uom="m">12.5</measuredHeight>
    </Building>
  </cityObjectMember>
</CityModel>

```

b)

CityJSON, CityGML ile aynı kavramsal veri modelini temel almakla birlikte, bu modeli daha sade ve modern bir yapıyla sunmayı amaçlayan alternatif bir kodlama formatıdır. JSON temelli yapısı, daha düşük dosya boyutları, hızlı veri erişimi ve kolay ayrıştırma gibi operasyonel avantajlar sağlayabilmektedir. CityJSON'da tüm şehir nesneleri, iç içe geçmiş yapılar yerine düz bir sözlük biçiminde organize edilir. Bu da geliştiricilerin veri içeriğine daha doğrudan erişmesini ve veri işleme süreçlerini daha etkin şekilde yürütmesini kolaylaştırır. Şekil 5.13'ün sol tarafında gösterilen CityJSON örneği, bu sadeleştirilmiş yapının temel karakteristiğini yansıtmaktadır.

Web tabanlı uygulamalar, entegrasyon servisleri veya performans odaklı çözümler için CityJSON önemli kolaylıklar sağlayabilir [196].

CityGML'in detaylı, genişletilebilir ve kurumsal altyapılarda yaygın olarak benimsenmiş XML tabanlı yapısı birçok kamu kurumu ve standart sistemle yüksek uyumluluk sunmaya devam etmektedir [196]. Bu nedenle, tercih edilecek veri formatı, teknik gereksinimler kadar kurumsal altyapı, entegrasyon düzeyi ve kullanım senaryoları kadar dikkate alınmalıdır.

5.3 LandINFRA Standartı

OGC tarafından geliştirilen LandInfra, CBS ve BIM disiplinlerinde ortak kavramları kapsayan açık ve kavramsal bir veri modeli sunar. Yollar, demiryolları, binalar, parseller, arazi ve ölçme verileri gibi mühendislik altyapılarının yanı sıra kat mülkiyeti ve irtifak hakları gibi mülkiyet ilişkilerini tanımlayabilir. Yalnızca yüzeyde değil yer altı altyapı unsurlarını da kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. LandInfra, içerdiği tematik bileşenlerle CAD, BIM ve CBS verilerini tek bir çatı altında birleştirme potansiyeline sahiptir [199, 200].

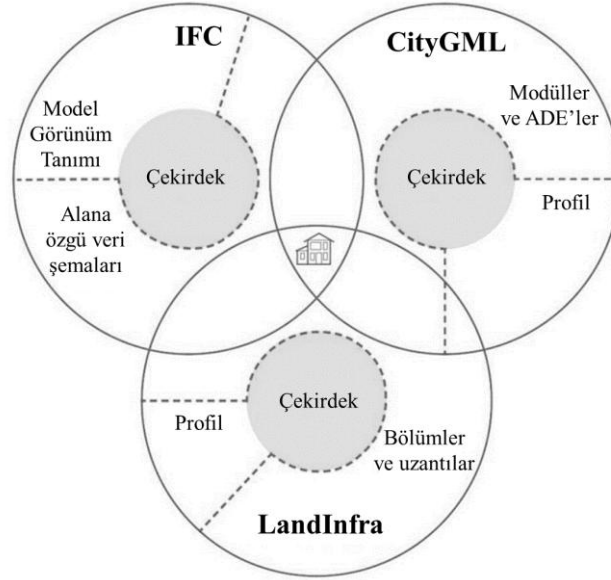
IFC, CityGML ve LandInfra gibi üç temel açık standart, yapılı çevrenin dijital ortamda bütüncül biçimde temsilini mümkün kılmaktadır. IFC, bina ve altyapı bileşenlerinin detaylı paylaşımını sağlarken CityGML, şehir ölçeğinde CBS uyumlu veri modellemesi sunar. LandInfra ise arazi ve altyapı projelerine odaklanarak bu iki sistem arasında kavramsal bir köprü işlevi görür [199].

UML tabanlı yapısı ve GML üzerinden kodlanan InfraGML formatı sayesinde CityGML ile teknik olarak uyumludur. IFC ile bazı sınıflar düzeyinde örtüşen yapılar içerir. Özellikle “*Alignment*” bileşeni, doğrudan *IfcAlignment*¹⁵ standardına dayanır ve bu benzerlik iki standardın daha entegre biçimde kullanılmasına zemin hazırlar [199].

¹⁵ **IfcAlignment**, yol, demiryolu, tünel, köprü gibi lineer altyapı projelerinin eksenini (referans hattını) tanımlamak için kullanılır. Bir yapının doğrultusunu, güzergâhını veya konumsal omurgasını temsil eder.

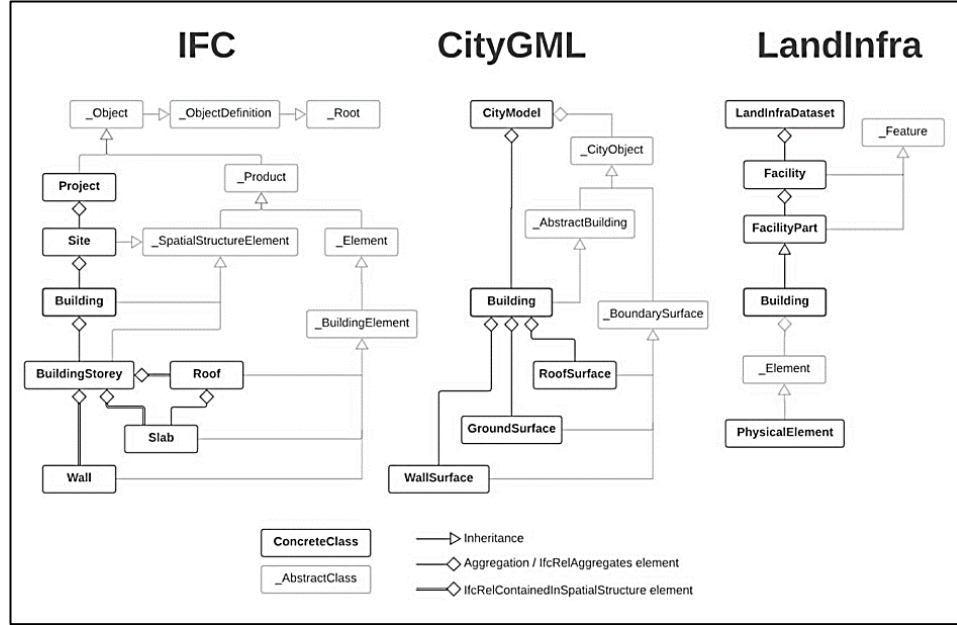
mekanizmalar içerir. IFC tarafında ise genişletme yerine, belirli proje senaryolarına uygun alt kümelerin seçilmesi MVD yapılarıyla gerçekleştirilir [199].

Şekil 5.15 IFC, CityGML ve LandInfra Standartlarının Genişletilebilirlik Özellikleri [199]



Üç standart arasındaki temel farklardan bir diğeri, yapı elemanlarının geometrik olarak nasıl kavramsallaştırıldığıdır. Her biri “bina” temasını içerse de bu kavramı farklı sektör ihtiyaçlarına göre ve kendine özgü kavramsal çerçeveye işler (Şekil 5.16). IFC4’te bina, fiziksel bileşenleri ayrıntılı biçimde tanımlanmış, yapım süreçlerine uygun bir varlık olarak modellenir. Duvar, döşeme, çatı gibi her bir öge, malzeme ve işlev bilgisiyle birlikte ele alınır. CityGML’de ise bina, daha çok şehir düzeyinde analizlere yönelik olarak, çatı yüzeyi, duvar yüzeyi gibi tematik yüzeylerle temsil edilir. LandInfra tarafında bina, doğrudan bir üst yapı unsuru olarak değil, “tesis parçası” (*facilityPart*) altında tanımlanan bir alt bileşen şeklinde ele alınır [36]. Şemada görüldüğü gibi her bir modelin geliştirdiği sınıflandırma mantığı ve nesneler arası ilişki yapısı farklılık gösterir. Farklılıklar dikkate alınarak entegrasyon süreçlerindeki dönüşüm kurallarının dikkatle tanımlanması ve teknik uyumluluk mekanizmalarının titizlikle planlanması gereklidir [199].

Şekil 5.16 IFC, CityGML ve LandInfra Standartlarında Binanın Kavramsal Modellenmesi [199]



LandInfra modeli hem yerel hem de coğrafi koordinat sistemlerinin birlikte kullanılmasına olanak tanır. Geometrik olarak yalnızca B-Rep desteği sunar. Parametrik tabanlı modelleme düşünülmüş olsa da uygulanmamıştır. LOD kavramı bulunmaz. Nesne kimliklendirme açısından LandInfra, global/evrensel benzersiz kimlik (UUID) zorunluluğu getirmez. Nesnelerin yalnızca model kapsamında ayırt edici olacak biçimde tanımlanması yeterlidir. [199].

5.4 CBS ve BIM'in Birlikte Çalışabilirliği

CBS, konuma dayalı verilerin toplanması, analiz edilmesi ve görselleştirilmesini sağlayan güçlü bir sistem olarak karar destek süreçlerinde önemli bir rol üstlenmektedir. CBS'nin temel özelliği tüm verilerin coğrafi bir referansla ilişkilendirilmesidir. Şehir planlaması, afet yönetimi ve çevresel etki değerlendirmesi gibi alanlarda konum, zaman ve içerik verilerinin birlikte analiz edilebilmesi, CBS'yi mekânsal odaklı stratejilerin vazgeçilmez aracı haline getirmiştir [201-204].

Geçmişte CBS ve BIM arasında bilgi aktarımı çoğunlukla tek yönlü iken [205], günümüzde birlikte çalışabilirlik standartları ve dönüşüm araçları sayesinde proje yaşam döngüsünün farklı aşamalarında entegre biçimde kullanılabilmektedir. Veri

formatlarındaki farklılıklar, semantik model uyumsuzlukları, ölçek farkları ve koordinat sistemlerinin dönüştürülmesi gibi bazı teknik zorlukları da beraberinde getirerek entegrasyon sürecini zorlaştırabilmektedir [206]. ISO 19166 gibi uluslararası alanda birlikte çalışabilirliği sağlayan standartlar bu alanda temel bir çerçeve sunarken, 2017 yılında ESRI ile Autodesk arasında imzalanan stratejik ortaklıkla birlikte “BIM to GeoMapping (B2GM)” yaklaşımı geliştirilmiştir. ArcGIS Pro’nun Revit dosyalarını doğrudan okuyabilmesi ve GeoBIM gibi çözümlerle iki sistem arasında kesintisiz veri akışı sağlanmıştır [207]. Bulut teknolojileri ve IoT tabanlı altyapılar da çok paydaşlı iş birliklerini ve gerçek zamanlı veri akışını kolaylaştırmıştır [208-210]. Tüm bu gelişmeler, CBS ve BIM entegrasyonuna küresel ölçekte önemli bir ivme kazandırmıştır.

CBS, daha çok mekânsal verilerin yönetimi, konumsal analizler ve coğrafi düzeydeki ilişkileri ele alırken BIM, yapı içi bileşenleri mühendislik detaylarıyla birlikte tanımlar. Örneğin, CBS tabanlı bir model olan CityGML’de bir duvar, sınırlandığı her mekân için ayrı bir yüzey olarak temsil edilirken, BIM tabanlı IFC formatında aynı duvar hacimsel bir yapı elemanı olarak yalnızca bir kez tanımlanır ve birden fazla mekânla ilişkilendirilir [201]. İki sistemin veri modeli, kullanım amacı ve mekânsal organizasyon biçimi açısından birbirlerinden ayrışmaktadır.

Tablo 5.1 CBS ve BIM'in Bina Yaşam Döngüsünde Kullanımı [211]

Bina Yaşam Döngüsü	BIM-CBS Ortak Uygulamaları
Planlama ve Tasarım	Yer seçimi BIM tasarım modelleri ve CBS veri tabanlarından iklim verilerinin entegre edilmesi yoluyla iklim değerlendirmesi Semantik web teknolojileri ile enerji verimliliği performansının değerlendirilmesi ve optimize edilmesi Entegre bir BIM-CBS platformuna dayalı iç mekân akustik tasarımı 3B kadastro görselleştirmesi Mekânsal karar destek sistemi Planlama ve yönetim optimizasyonu Altyapı haritaları ve BIM CBS'de birleştirilerek planlamanın desteklenmesi
İnşaat	İnşaat tedarik zinciri yönetim sistemi İnşaat güvenliği ve risk yönetimi Ekipman bakım ve yönetimi İnşaat aşamasındaki hata, lojistik ve atık azaltılması LiDAR + BIM eşleştirilerek GeoBIM altyapısı oluşturulması
İşletme ve Bakım	Acil müdahale ve iç mekân navigasyonu Tesis varlık yönetimi Boru ağları için bilgilerin tespit edilmesi ve haritalanması Entegre bir BIM-CBS platformunda miras koruma tabanı Binalardaki sel hasarının değerlendirilmesi Sel baskın simülasyonu Dijital inşaat izin yönetmeliklerini kontrolü için GeoBIM kullanımı Kapalı alan CBS sistemi geliştirme Kapalı alan rota planlama ve navigasyon Tünel yönetimi Köprü yönetimi Otoyol planlaması Su dağıtım sistemi planlaması Yer altı kamu hizmeti yönetimi Hidroelektrik projelerin yönetimi Bina sağlığı değerlendirilmesi Düşük enerji performanslı bina tasarımı ve yönetimi
Yıkım	Atık tahmini, atık ayrıştırma ve hesaplama Açık deniz platformlarının sökülmesi Yıkım süresince atık planlaması

Entegrasyonun en önemli katkılarından biri, projelerin sadece bina içi verilerle sınırlı kalmayıp çevresel koşullar ve dış mekân bağlamlarıyla beraber alınabilmesidir [212]. CBS mekânsal analiz ve topoğrafik verilerle çevresel bağlamı ortaya koyarken, BIM yapıların fiziksel ve işlevsel detaylarını sunar. Birlikte kullanıldıklarında bina

yaşam döngüsünün farklı aşamalarında daha bütüncül ve derinlemesine analizler yapılabilmektedir (Tablo 5.1). BIM modelleri, konumsal ilişkileri doğrudan temsil etmekte sınırlı kaldığında, CBS devreye girer. Topoğrafik veriler ve mekânsal analiz yetenekleri sayesinde modeller, bulundukları çevre ve altyapıyla etkileşime girebilir [213, 214].

Birlikte dijital şehir modelleri ve bina temelli planlama süreçlerine de büyük katkı sağlarlar. Büyük ölçekli altyapı projelerinde tamamlayıcılık çok daha belirgindir. Örneğin bir baraj ya da otoyol projesi, CBS'den sağlanan arazi yapısı, eğim, drenaj gibi verilere ihtiyaç duyar. Benzer şekilde bir şantiye planlanırken kule vinçlerin en verimli şekilde yerleştirilebilmesi için, CBS'den alınan yerel mekânsal analizler hayati rol oynar. Birlikte kullanılmaları planlama, tasarım, uygulama ve işletme aşamalarında daha kapsamlı ve sürdürülebilir çözümler geliştirmenin önünü açmaktadır [215].

Tablo 5.2'te gösterildiği üzere, kalite, zaman, maliyet, iş sağlığı ve güvenliği ile bilgi yönetimi gibi birçok alanda CBS'nin sunduğu konumsal analiz, harita tabanlı izleme ve coğrafi veri modelleme yetenekleri, BIM'in yapısal verileriyle bütünleşerek daha etkili, şeffaf ve konuma duyarlı karar süreçlerini mümkün kılmaktadır [213].

Tablo 5.2 CBS–BIM Entegrasyonunun Proje Yönetimi Alanlarına Katkıları

Yönetim Süreçleri	BIM'in Sağladığı Faydalar	BIM–CBS Entegrasyonunun Katkıları
Kalite Yönetimi	BIM, kaliteye ilişkin bilgileri tek bir dijital modelde toplayarak veri izlenebilirliğini sağlar. Disiplinler arası çatışmaları önceden tespit edip paylaşarak tasarım hatalarını ve yeniden iş yapma oranını düşürür. Yapı elemanlarına ait kalite standartları ve kontrol prosedürleri model üzerinden planlanabildiği için kalite gereksinimlerinin karşılanması kolaylaşır [216].	Coğrafi referanslı denetim verilerini BIM modeliyle ilişkilendirip mekânsal ve zamansal düzlemde kalite takibini mümkün kılar. Sahada toplanan kalite kontrol verilerinin harita tabanlı modellere entegre edilmesi sayesinde gerçek zamanlı izleme, raporlama ve performans analizi gerçekleştirilebilir. Kalite muayene sonuçları yapı elemanlarının konum bilgisiyle birlikte değerlendirildiğinden, saha kusurlarının hızlı tespiti ve paydaşlar arası etkin koordinasyon sağlanarak kalite güvence süreçleri iyileştirilir [216].
İlerleme ve Zaman Yönetimi	BIM, yapım sürecini takvim üzerinde simülasyon ve görselleştirmelerle planlama imkânı sunar. Bu yöntem belirsizlikleri azaltır, inşaat programının daha etkin kontrol edilmesini sağlar. Görev akışlarının ve yapı bileşenlerinin zaman çizelgesinde canlandırılması ise planın anlaşılmasını kolaylaştırarak paydaşların süreci daha iyi öngörmesine yardımcı olur [217].	Projenin ilerleyişini konuma duyarlı veri analitiğiyle destekleyerek inşaat programının coğrafi bağlamda izlenmesini sağlar. İHA görüntüleri, uzaktan algılama verileri ve sensör çıktıları CBS altyapısında analiz edilerek sahadaki ilerleme durumu harita tabanlı olarak doğrulukla izlenebilir. Böylece lojistik darboğazlar erken tespit edilir, yapım sıraları optimize edilir ve kaynak kullanımı etkinleştirilir [218]. Geniş alanlı projelerde, şantiyenin farklı bölgelerindeki çalışmaların harita üzerinden eşzamanlı izlenmesi ekip koordinasyonunu ve iş sürekliliğini sağlar [219].
Sözleşme Yönetimi	BIM, proje kapsamını ve çıktıları dijital model üzerinde netleştirerek taraflar arasındaki anlaşmazlık riskini azaltır. Tüm proje dokümanlarını tek bir veri tabanında topladığı için iş kalemleri ve sorumluluk dağılımı daha şeffaf hale gelir. Ayrıca ortak veri ortamı sayesinde güncel bilgilere tüm paydaşlar aynı anda erişebilir. Kısaca, sözleşme şartlarının takibi ve değişikliklerin yönetimi daha etkin yapılır [220].	CBS, büyük ölçekli projelerde sözleşme yönetimini harita tabanına taşıyarak ihale kalemleri, hakedişler, teslimatlar ve alt yüklenici sorumluluklarının coğrafi olarak izlenmesini sağlar. Harita tabanlı panolar üzerinden sözleşmeye bağlı faaliyetlerin görselleştirilmesiyle her iş kalemi sahadaki konumuyla ilişkilendirilir. İlerleme, ödeme ve teslimatlar gerçek zamanlı takip edilebilir [221].
Maliyet Yönetimi	BIM, maliyet yönetiminde 5B modeli ile tasarım ve yapım süreçlerini bütçe boyutunda entegre ederek erken aşamalardan itibaren detaylı ve doğru maliyet tahminleri yapılmasına imkân tanır [222]. Sayısal modelden otomatik metraj çıkarımı ve sürekli güncellenen maliyet analizleri sayesinde beklenmedik	Proje maliyet yönetimine mekânsal bir boyut kazandırarak, tasarım kararlarının ve sahadaki koşulların bütçeye etkisinin daha bütüncül şekilde değerlendirilmesini mümkün kılar. CBS, malzeme tedarik rotaları, taşıma mesafeleri ve çevresel koşullar gibi verileri maliyet modellerine entegre ederek daha gerçekçi ve optimizasyon odaklı bütçeleme yapılmasına olanak

Yönetim Süreçleri	BIM'in Sağladığı Faydalar	BIM–CBS Entegrasyonunun Katkıları
	giderler ve bütçe aşırımları önemli ölçüde azalır. Karmaşık projelerde dahi BIM kullanımı finansal kontrolü güçlendirmektedir [223].	tanır. Entegre CBS panoları aracılığıyla harcama ve finansman verilerinin anlık izlenmesi, paydaşların mali farkındalığını artırarak daha rasyonel mali kararların alınmasına katkı sağlar [224].
Sağlık, Güvenlik ve Çevre Yönetimi	BIM, iş sağlığı, güvenliği ve çevre yönetiminde inşaat sürecinin her aşamasında risklerin öngörülüp azaltılmasına katkı sağlar. BIM tabanlı dijital modeller sayesinde potansiyel tehlike bölgeleri önceden tespit edilerek proje özelinde İSG planları oluşturulabilir. Tasarım değişiklikleri modele yansıtılıp tüm paydaşlara güncel güvenlik bilgileri hızlıca iletilebilir [225].	Sahaya ilişkin tehlike ve çevresel verilerin yapı modeline entegre edilmesini sağlayarak daha bütüncül bir risk yönetimi yaklaşımı sunar. CBS destekli gerçek zamanlı izleme sayesinde, şantiyedeki riskli bölgeler ve çevresel hassas alanlar harita üzerinden anlık olarak takip edilebilir. Bu sayede kaza riski azaltılırken çevresel etkiler de asgari düzeye indirilebilir. Coğrafi tabanlı acil durum ve tahliye senaryolarının BIM modelindeki detaylarla bütünleştirilmesi, olası afet ve kriz durumlarında daha etkili müdahale ve koordinasyon imkânı sağlar [226].
Bilgi Yönetimi	BIM, bilgi yönetiminde proje verilerini tek bir dijital platformda toplayarak tutarlı ve izlenebilir bir veri akışı sunar. Ortak Veri Ortamı (CDE) aracılığıyla çizim, doküman ve sayısal veriler entegre bir şekilde yönetilip tüm ekip üyelerince gerçek zamanlı erişilebilir hale gelir. Veri tekrarları ve kayıpları önlenir [226].	Bilgi yönetiminde yapısal veriler ile mekânsal verileri bir araya getirerek veri bütünlüğünü ve erişilebilirliğini artırır. Bu bütünleşik yaklaşımla tesis ve altyapı verileri gerçek zamanlı olarak izlenebilir ve coğrafi bağlam içinde görselleştirilebilir. Farklı disiplinler ve kurumlar arasında bilgi paylaşımı kolaylaşır. Proje verileri üzerinden, konumsal sorgulama ve analiz imkânları sayesinde yöneticiler daha etkili bilgi yönetimi ve raporlama gerçekleştirebilir [226].
Farklı Sektörlerin Koordinasyonu	BIM, proje paydaşlarını tek bir dijital modelde buluşturarak disiplinler arası koordinasyonu güçlendirir. Ortak veri seti sayesinde eşzamanlı çalışma ve çatışma tespiti mümkün olur. Böylece tasarım entegrasyonu gelişir ve sahada ortaya çıkabilecek uyumsuzluklar önceden önlenir [220].	CBS, yapı modellerini kadastral veriler, ulaşım ağları, altyapı hatları ve imar planlarıyla entegre ederek sektörler arası iş birliğini güçlendirir. Projeler tampon analizi, konumsal sorgulama ve ağ tabanlı hesaplamalar gibi gelişmiş CBS araçlarıyla çok yönlü incelenebilir. Belediyeler ve altyapı kurumları da bu altyapıyı kullanarak mekânsal veriye dayalı, senaryo temelli ve karar destek odaklı katkılar sunabilir [227].

5.5 BIM Teknolojisinin CBS ile Entegrasyon Aşamaları

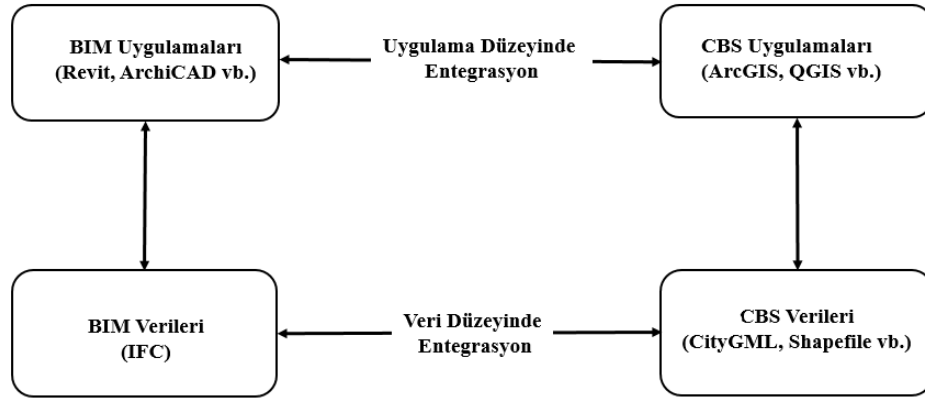
BIM'de yer alan detaylı yapısal bilgiler, CBS ortamında doğrudan karşılık bulamayabilir. Aynı şekilde, BIM modellerinde tanımlanan bazı nesnelerin coğrafi bağlamdaki önemi, CBS sistemlerinde yeterince temsil edilemeyebilir. CBS, yapıların ve bina bileşenlerinin coğrafi bilgilerine odaklanırken BIM, yapısal elemanların ve bunların semantik bilgilerinin proje dosyasında ayrıntılı olarak depolanmasını sağlar. CBS uygulayıcıları, BIM modellerini dış mekânsal bağlamla ilişkilendirerek projelere coğrafi derinlik katarken BIM uygulayıcıları ise CBS sistemlerini iç mekâna dair ayrıntılı bilgilerle zenginleştirir. Entegrasyon, her iki sistemin de güçlü yönlerini bir araya getirerek daha kapsamlı çözümler üretmeyi mümkün kılmaktadır [228].

BIM ile oluşturulan üç boyutlu modeller, yerel koordinat sistemlerinde çalışır ve yapı ölçeğinde yüksek ayrıntı sunmaktadır. Kapalı alanlarda yön bulma [229, 230] ve bina enerji modellemesi [231] gibi uygulamalarda etkin biçimde kullanılabilir. Öte yandan, CBS tabanlı üç boyutlu modeller kentsel ölçekte çalışır ve küresel koordinat sistemlerini temel alır. CBS; hidroloji, mekânsal, zamansal analizler ve çeşitli coğrafi veri odaklı uygulamalar için güçlü analiz yetenekleri sağlar [53].

Bina bilgileri 2B formatında oluşturulduğunda, bunların bir CBS ortamına aktarılması ve kullanılmasında sorunlar yaşanmaktadır. Örneğin, AutoCAD dosya formatının CBS'de karşılığı olmadığından (CBS, CAD verilerini işleyebilir, ancak operatörün önce verileri düzenlemesi gerekir), dönüştürme aşamasında bilgiler kaybolabilir. Günümüzde 3B şehir modelleri için de benzer bir durum söz konusudur. BIM tarafından üretilen 3B modeller farklı dosya formatlarında depolanır ve bunların arasında en çok kullanılan IFC formatıdır. CBS tarafından üretilen 3B modeller de farklı veri formatlarında depolanır. Bunlardan Shapefile, CityGML ve CityJSON dönüşüm işlemlerinde yaygın olarak kullanılır [53].

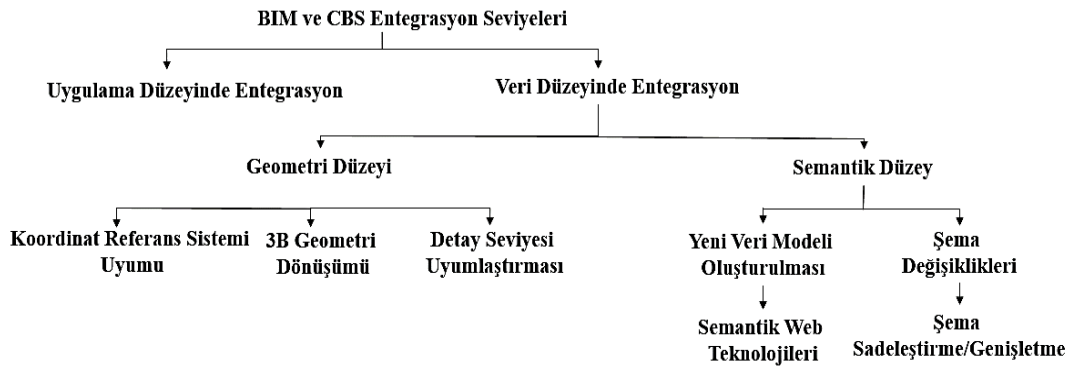
BIM ve CBS sistemleri arasındaki entegrasyon genellikle veri ve uygulama düzeyi olmak üzere iki temel seviyede ele alınır (Şekil 5.17) [228].

Şekil 5.17 BIM ve CBS Entegrasyonunun Temel Seviyeleri [228]



Yapılan araştırmalar, uygulama düzeyindeki entegrasyonun, veri düzeyine göre daha az ele alındığını göstermektedir. Bunun başlıca nedeni, bu aşamanın yalnızca veri aktarımını değil aynı zamanda tüm sistemin kararlılıkla çalışmasını da gerektirmesidir. Bu da sürecin daha karmaşık ve zaman alıcı olmasına yol açmaktadır. Zhu ve Wright Şekil 5.18’de gösterildiği üzere, Veri Düzeyinde entegrasyonu kendi içinde Geometrik Düzey ve Semantik Düzey olmak üzere iki alt kategoriye ayırıştır. Uygulama düzeyi ise Hizmet Tabanlı veya Eklenti Tabanlı çözümlerle açıklanmıştır [232].

Şekil 5.18 BIM ve CBS Entegrasyon Seviyeleri [232]



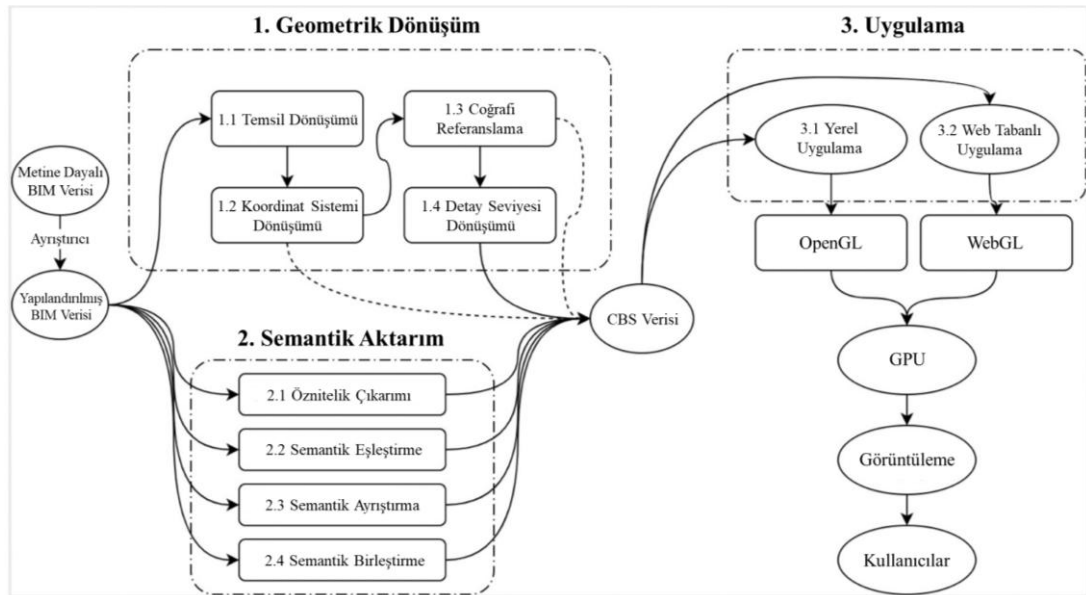
Farklı araştırmacılar, entegrasyon süreçlerini farklı bakış açılarıyla ele almıştır. Irizarry ve Karan yalnızca veri ve uygulama düzeyine odaklanırken, Kang ve Hong bu yapıyı daha ayrıntılı biçimde “Şema Tabanlı, Hizmet Tabanlı, Ontoloji Tabanlı, Süreç

Tabanlı ve Sistem Tabanlı” olmak üzere beş grupta değerlendirmiştir. Öte yandan, Amirebrahimi ve Rajabifard veri, süreç ve uygulama düzeylerini kapsayan üç basamaklı bir model geliştirmiştir [232].

5.5.1 Veri Düzeyinde Entegrasyon

BIM verilerinin CBS tabanlı modellere dönüştürülmesi, geometrik ve semantik düzeyde çeşitli teknik aşamaları içermektedir. BIM verileri geometrik yapısında biçim, konum ve boyut gibi mekânsal özellikleri içerirken semantik düzeyde bu yapı elemanlarına ait malzeme, tür ve işlev gibi bilgileri hiyerarşik bir biçimde tutmaktadır. BIM modellerindeki verilerin bütünlüğünü korumak için veri düzeyinde dönüşüm yapılırken hem geometri hem de semantik bilgilerin dönüşümleri olmak üzere iki aşamalı bir yöntem izlenir (Şekil 5.19) [233].

Şekil 5.19 Geometrik ve Semantik Dönüşüm Aşamalarının Gösterimi [233]

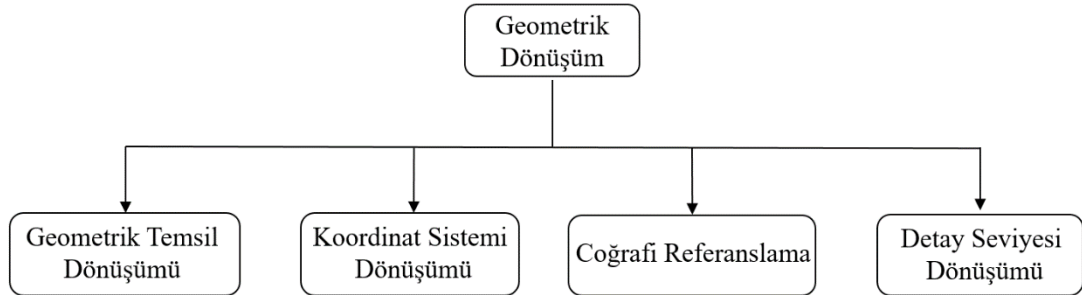


5.5.1.1 Geometrik Dönüşüm Aşamaları

Geometrik dönüşüm sürecinde, Şekil 5.20’de görüldüğü üzere ilk olarak BIM modellerinde sıkça kullanılan CSG veya *Swept Solid* temsil biçimlerini B-Rep olarak bilinen sınır temsiline dönüştürülür. Bu adımı modelin yerel koordinat sisteminden coğrafi referans sistemine aktarılması izler. Ardından, modelin gerçek dünya üzerindeki konumuyla ilişkilendirilmesi yani coğrafi referanslama işlemi

gerçekleştirilir. Son aşamada modelin içeriği ve geometrisi hedef CBS uygulamasının gereksinim duyduğu detay seviyesine (LoD) göre sadeleştirilir ve uyarlanır.

Şekil 5.20 Geometrik Dönüşüm Aşamaları [233]



5.5.1.1 Geometrik Temsil Dönüşümü

BIM ile CBS sistemlerinin farklı modelleme yaklaşımlarına sahip olması, geometrik dönüşüm sürecinde özel bir adım olan “Geometrik Temsil Dönüşümünü”nü zorunlu kılar. BIM, nesneleri çoğunlukla yarıçap, yön, uzunluk gibi geometrik parametrelerle ifade eden parametrik modelleme tekniklerine dayanır ve bu sayede esnek düzenlemelere olanak tanır [200]. BIM modellerinde yaygın olarak CSG, SS ve *Clipping*¹⁶ gibi teknikler kullanılırken, IFC formatındaki yapı bileşenlerinin büyük bölümü CSG ve SS kullanılarak modellenir. B-Rep ise çok sık kullanılmaz.

BIM modelleri parametrik yapıları sayesinde esnek düzenlemelere imkân tanır. Ancak verilerin CBS ortamında kullanılabilmesi için temsil biçimlerinin dönüştürülmesi zorunludur. Temsil dönüşümü veri sürekliliği ve semantik bütünlüğün korunması açısından da yüksek düzeyde doğruluk ve tutarlılık sağlanmalıdır [234].

Yapısal farklılıklar nedeniyle, BIM verilerinin CBS ortamında etkin biçimde kullanılabilmesi için temsil biçimlerinin dikkatle dönüştürülmesi gerekir. Temsil dönüşümü, veri sürekliliği ve semantik bütünlüğün korunması açısından yüksek düzeyde doğruluk ve tutarlılık sağlamalıdır.

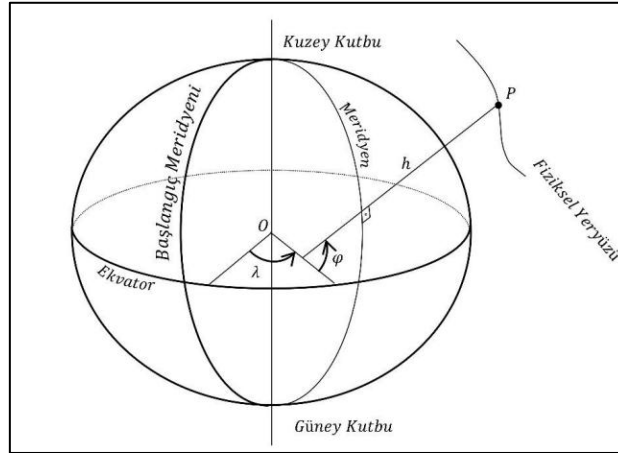
¹⁶ **Clipping**, BIM modellerinde belirli bir bölgenin görselleştirilmesini sağlamak amacıyla modelin kesit düzlemleri veya hacimsel kutular aracılığıyla geçici olarak kırılması işlemidir. Bu yöntem, iç yapıları analiz etmek veya odaklı sunumlar oluşturmak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

5.5.1.1 Koordinat Sistemi Dönüşümü

IFC projelerinde nesneler çoğunlukla birbirlerine göre konumlandırılmış yerel koordinat sistemlerinde (*Local Coordinate Systems, LCS*) tanımlanır. Literatürde bu yapı genellikle *Engineering Coordinate System* olarak anılmaktadır. Koordinat sistemleri hiyerarşik ve göreceli (*relative placement*) biçiminde yapılandırılmıştır. Yani *IfcProject*, *IfcSite*, *IfcBuilding*, *IfcBuildingStorey* gibi varlıkların her biri, bir üst seviyeye göre konumlandırılarak birbiriyle ilişkili yerel koordinat sistemlerinden oluşan kademeli bir yapı oluşur [235].

CBS nesnelerin Dünya üzerindeki konumlarını tanımlamak için coğrafi koordinat sistemleri kullanır. Genellikle enlem (ϕ), boylam (λ) ve elipsoidal yükseklik (h) gibi eğrisel koordinatlarla tanımlanan bu sistemler, jeodezik referans elipsoidine dayalıdır (Şekil 5.21) [236]. Bu nedenle IFC içindeki yapı bileşenlerinin konum bilgilerinin küresel CBS koordinat sistemlerine uygun biçimde dönüştürülmesi gerekir [234].

Şekil 5.21 Yeryüzündeki Bir P Noktasının Elipsoidal Koordinatları [237]



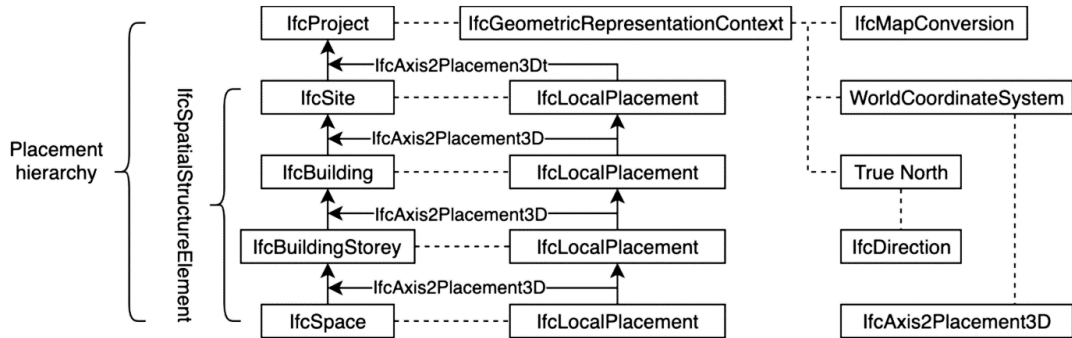
5.5.1.1 Coğrafi Referanslama

Coğrafi referanslama (*georeferencing*), bir harita, uydu görüntüsü veya dijital verinin, gerçek dünya koordinatlarıyla eşleştirilerek mekânsal konumunun tanımlanması sürecidir. BIM modellerinin ulaşım ağları, arazi örtüsü, topoğrafya, hidroğrafya ve idari sınırlar gibi çevresel coğrafi verilerle birlikte CBS ortamına entegre edilebilmesi için bu süreç kritik öneme sahiptir. CBS alanında coğrafi

referanslama yöntemleri oldukça gelişmiş olmasına karşın, BIM-CBS entegrasyonunda asıl sorun, bu referans bilgilerinin IFC standardı içinde nasıl yerleştirileceğiyle ilgilidir. Büyük ölçekli inşaat projelerinde IFC standartlarının konum bilgisini yeterince açık biçimde içermemesi nedeniyle uygulamada bazı zorluklar ortaya çıkabilmektedir [180].

IFC modellerinde her nesne, kendi yerel koordinat sistemine göre tanımlanır ve doğrudan bağlı olduğu üst bileşene göre konumlandırılır. Modeli gerçek dünya koordinatları ile eşleştirmek istendiğinde ise tüm modelin başlangıç noktası, bir coğrafi referans sistemiyle (ör. WGS 84, ITRF, UTM vb.) ilişkilendirilir. Eşleştirme yapılırken nesnelerin tek tek küresel koordinatlara taşınması gerekmez. Bunun yerine, model bütün olarak CBS ortamına doğru konumda yerleştirilir. Böylece koordinat uyumu sağlanırken dönüşüm süreci de daha sade bir biçimde yönetilir. Bu dönüşüm ile BIM verileri, CBS ortamında kullanılan diğer mekânsal veri kümeleriyle sorunsuz bir şekilde çalışabilir. [181].

Şekil 5.22 Coğrafi Referanslama İçin Kullanılan IFC Ögeleri [235]



Şekil 5.22'de gösterildiği gibi, coğrafi referanslama işlemi yalnızca *IfcSite* ya da *IfcGeometricRepresentationContext* gibi birkaç varlıkla sınırlı değildir. IFC yapısında, *IfcProject*'ten başlayıp *IfcSpace*'e kadar uzanan tüm mekânsal hiyerarşi (*IfcSpatialStructureElement*) bu süreçte dikkate alınmalıdır. Her bir seviyedeki bileşen, bir üst düzeydeki koordinat sistemine göre konumlandırılır ve bu ilişki *IfcLocalPlacement* ile *IfcAxis2Placement3D* varlıkları üzerinden kurulur. Bu yapı sayesinde modeldeki her elemanın hangi yerel sistemde yer aldığı net biçimde belirlenebilir. Gerçek dünya konumuyla tam uyum sağlamak içinse

*WorldCoordinateSystem*¹⁷ (küresel koordinat sistemi), *IfcMapConversion* (harita dönüşüm parametreleri), *TrueNorth* (gerçek kuzey yönü) ve *IfcDirection* (yön vektörü) gibi temel bileşenlerin birlikte kullanılması gerekir. Bileşenler BIM modelinin gerçek dünya koordinatlarıyla hizalanmasını sağlayan temel yapı taşlarıdır [235].

Dönüşümün sonucu kullanılan IFC sürümüne doğrudan bağlıdır. IFC4 öncesi sürümlerde, modelin coğrafi olarak hassas biçimde konumlandırılmasını sağlayacak belirgin bir yapı yer almamaktadır. Örneğin IFC2x3 sürümünde yalnızca *IfcSite* varlığı altında tanımlanabilen “*Geographic Reference Point*” ile yaklaşık bir konum bilgisi verilebilmekte fakat mutlak doğruluk için yetersiz kalmaktadır. IFC4 ile birlikte getirilen *IfcMapConversion* sınıfıyla bu eksiklik giderilmiştir. *IfcMapConversion* sınıfı, yerel koordinatların küresel sistemlere aktarılabilmesini sağlayan altı temel parametre içerir: doğu-batı yönlü konum için E (*Easting*), kuzey-güney konum için N (*Northing*), yükseklik değeri için O (*Orthogonal Height*), yön tanımı için *XAxisAbscissa* ile *XAxisOrdinate* ve genel ölçeklendirme için S (*Scale*) [235].

Şekil 5.23 IfcMapConversion Koordinat Dönüşümü Denklemi [235]

$$[x' \ y' \ z'] = [x \ y \ z] \times \begin{bmatrix} S \times \cos \theta & S \times \sin \theta & 0 \\ -S \times \sin \theta & S \times \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + [E, N, O],$$

Dönüşüm açısı θ , X ekseninin yönünü tanımlayan *XAxis* bileşenleri kullanılarak hesaplanır. Böylece model hem doğru ölçekte döndürülür hem de küresel sistem üzerinde konumlandırılır. Dönüşüm matrisi (Şekil 5.23), BIM modelinin yerel koordinatlarının (x, y, z) doğru ölçekte döndürülüp yer değiştirilerek CBS koordinat sistemine (x', y', z') dönüştürülmesini sağlar [235].

Aplikasyon krokileri, bina ve parselin resmi koordinat bilgilerini içerdiği için IFC modelinin coğrafi konumlandırılmasında temel referans kaynaktır. Krokide yer alan koordinatlar, projeksiyon sistemine bağlı olarak IFC’de *Easting* (doğu yönü) ve

¹⁷ **WCS (World Coordinate System)**, model geometrilerinin yerleştirildiği sabit referans koordinat sistemidir ve diğer tüm koordinat sistemleri buna göre tanımlanır.

Northing (kuzey yönü) parametreleriyle temsil edilir. Kot bilgisi Orthogonal Height olarak işlenir. Kullanılan datum ve projeksiyon sistemi (örneğin ITRF96/TM30) *IfcProjectedCRS* nesnesinde tanımlanır. Bina yönü krokide doğrudan sayı olarak verilmez. Kuzey oku ve bina oturum çizgisi üzerinden ölçülerek $\cos\theta$ ve $\sin\theta$ değerleri XAxis Abscissa ve XAxis Ordinate alanlarına girilir. Ölçek ise model birimi metre olduğunda 1.0 olarak korunur. Böylece IFC modeli tapu verileriyle uyumlu olacak şekilde yerleştirilebilir. Bina modelinin CBS’de yapılacak mekânsal analizler için doğru konuma oturtulması önemlidir.

BIM verileri ile CBS verilerinin koordinat sistemleri arasında bir dönüşüme ihtiyaç vardır. Bu dönüşüm denklemi Şekil 5.24’te gösterilmiştir.

Şekil 5.24 Koordinat Dönüşüm Denklemi [238]

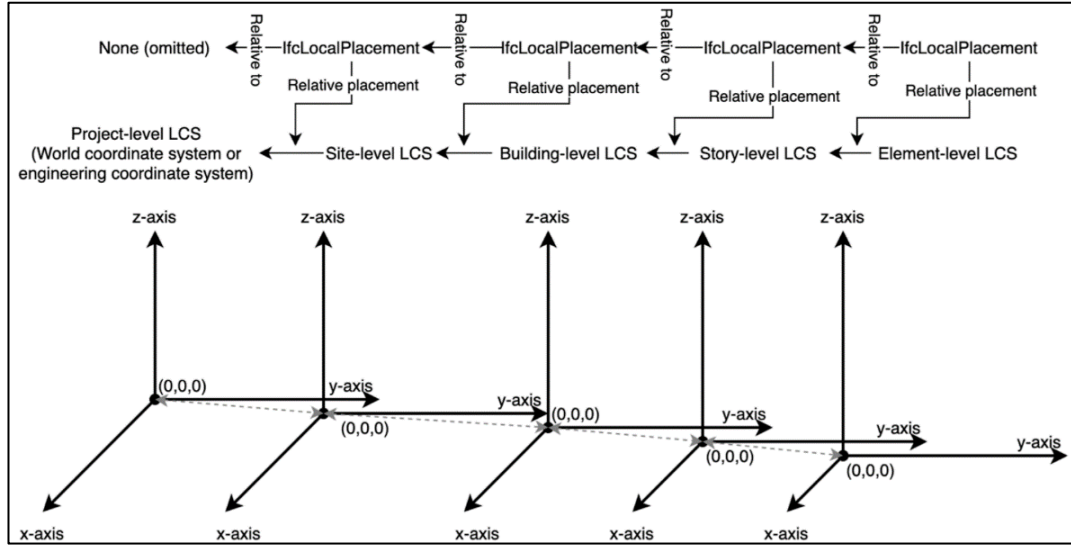
$$(a) \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = D \cdot \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$(b) \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}$$

Literatürde bu dönüşüm için önerilen matematiksel yöntemler denklem (a) ve (b)’de gösterilmiştir. Denklem (a), nesne köşe noktalarının yerel koordinat sistemindeki konumlarının hesaplanmasında, denklem (b) ise yerel koordinatlardan gerçek dünya koordinat sistemine dönüşümde kullanılmaktadır [104,105]. Burada “D” taşıma mesafesini, (V_x , V_y , V_z) vektörü yön bilgisini, θ_x , θ_y , θ_z açıları dönüş eksenlerini, (Δx , Δy , Δz) vektörü ise yerel orijinden gerçek dünya koordinat sistemine olan öteleme miktarını ifade etmektedir [238].

IFC veri modelinde her yapı elemanı, hiyerarşik bir yerleştirme sistemi içerisinde tanımlanmış kendi yerel koordinat sistemine sahiptir. Hiyerarşi, *IfcProject* $\rightarrow$ *IfcSite* $\rightarrow$ *IfcBuilding* $\rightarrow$ *IfcBuildingStorey* $\rightarrow$ *IfcSpace* şeklinde ilerler ve her seviye, *IfcLocalPlacement* ile bir üst seviyeye göre konumlandırılır [235]. Mekânsal uyum bu yapıyla sağlanırken, coğrafi referanslama *IfcSite* varlığında tanımlanan enlem, boylam ve yükseklik bilgilerinin CBS ile ilişkilendirilmesiyle mümkün olur (Şekil 5.25).

Şekil 5.25 IFC Yerleştirme Hiyerarşisinin Gösterimi [235]



IFC formatında tüm bina bileşenleri yerleştirme hiyerarşisi (*placement hierarchy*) çerçevesinde konumlandırılır. Her nesne (örn. bir pencere), kendisinden bir üst düzeydeki nesneye (örn. penceresinin bulunduğu kat) göre tanımlanır ve bu ilişki *IfcLocalPlacement* varlığı ile ifade edilir. Böylece bir yapı elemanının geometrisi, kendi yerel sisteminden başlayarak katman katman üst sistemlere aktarılır. *PlacementRelTo* özneliği ile hangi üst sınıfa göre yerleştirildiğini ve *RelativePlacement* ile alt nesnenin orijini ve yönelimini belirtir. Her nesnenin kendi yerel koordinat sistemi vardır ve bu sistemler birbirine göre dönüştürülerek mutlak konum belirlenir. *PlacementRelTo* değeri boş ise nesne doğrudan proje koordinat sistemine göre konumlandırılmış demektir [235].

Kademeli hiyerarşik yerleştirme yapısı sayesinde, BIM modelinde tanımlanan herhangi bir yapı bileşeni, bulunduğu konumdan başlayarak aşama aşama üst seviyelere taşınır ve küresel ölçekte doğru bir şekilde konumlandırılır. Sonuç olarak BIM verilerinin CBS sistemleriyle entegre edilebilmesi için gerekli olan mekânsal doğruluk ve tutarlılık başarıyla sağlanmış olur.

BIM modellerinin coğrafi doğruluk düzeyini değerlendirmek amacıyla Clemen ve Hendrik, **LoGeoRef** adı verilen altı seviyeli bir sınıflandırma sistemi geliştirmiştir [12]. Bu sistem, modeldeki coğrafi referanslamanın yaklaşık bir adres bilgisinden başlayıp tam doğruluğa ulaşan bir süreci nasıl izlediğini gösterir.

LoGeoRef10, *IfcPostalAddress* ve *IfcSite* gibi varlıklarla yalnızca posta adresi üzerinden genel bir konum belirler [189].

LoGeoRef20, bina veya arsa konumunu tek bir coğrafi koordinatla, GPS uyumlu WGS84 sistemi (EPSG:4326) üzerinden tanımlar [189].

LoGeoRef30, *IfcLocalPlacement* kullanılarak yapının gerçek dünya üzerindeki konumunun yerel proje koordinatlarında kesin olarak belirlenmesini sağlar [189].

LoGeoRef40, *IfcGeometricRepresentationContext* ve *WorldCoordinateSystem* yapıları ile tüm proje modelinin tek seferde konumlandırılmasına imkân verir [189].

LoGeoRef50, *IfcMapConversion* ile uluslararası standart koordinat sistemleri (ör. WGS84, UTM) kullanılarak verinin küresel ölçekte doğru ve tutarlı şekilde kullanılmasını sağlar [189].

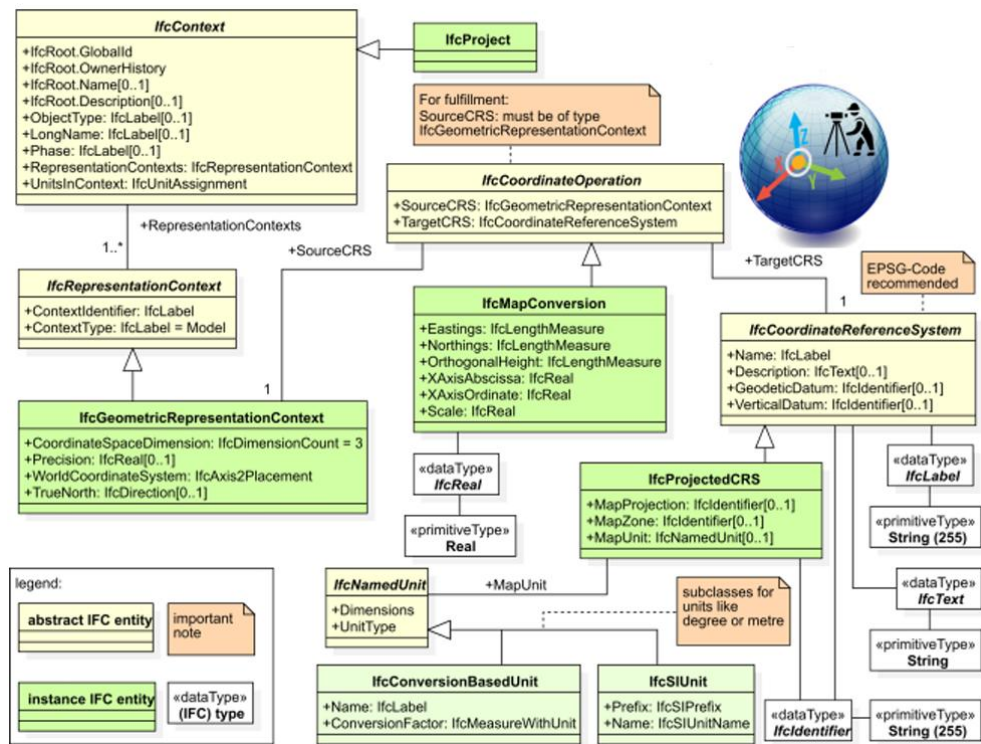
LoGeoRef60 ise birden fazla koordinat sistemi arasında dönüşüm yapabilmek için ortak kontrol noktalarından yararlanır [189]. Seviye yükseldikçe konum bilgisinin doğruluğu ve BIM modelinin CBS sistemlerine entegre edilebilme kapasitesi artar. Bu nedenle sistem, BIM modelinin CBS ile bütünleşme potansiyelini değerlendirirken önemli bir referans noktası sunar.

LoGeoRef50 seviyesinde (Şekil 5.26), *IfcMapConversion* kullanılarak BIM modelinin yerel koordinat sistemi ile EPSG kodu tanımlı bir küresel veya projeksiyonlu koordinat referans sistemi arasındaki dönüşüm parametreleri tanımlanır. Diyagram doğu-batı ve kuzey-güney ofsetleri (*Eastings*, *Northings*), yükseklik farkı (*OrthogonalHeight*), yerel X ekseninin hedef CRS'ye göre yön bileşenleri (*XAxisAbscissa*, *XAxisOrdinate*), ölçek faktörü (*Scale*) ve hedef CRS'nin adı, kodu ile projeksiyon bilgilerini (*IfcProjectedCRS*) içerir. Böylece model WGS84 (EPSG:4326), UTM gibi dünya genelinde tanınan koordinat sistemleriyle konum açısından uyumlu hale getirilir ve CBS ortamlarında doğru yerinde görüntülenir [186].

Sonuç olarak, IFC4 ve sonrası sürümlerde bu işlem için *IfcProjectedCRS* ve *IfcMapConversion* öğeleri mutlaka kullanılmalıdır. EPSG kodu, projeksiyon türü, zone bilgisi, ölçü birimi, zaman referansı (*epoch*), düşey datum, yükseklik türü ile

birlikte ofset, rotasyon ve ölçek değerleri açıkça belirtilmelidir. Ayrıca *WorldCoordinateSystem* ve *TrueNorth* alanları tanımlanmalı ve tüm bu bilgiler *IfcLocalPlacement* hiyerarşisiyle tutarlı olmalıdır. IFC2x3 sürümünde *IfcMapConversion* bulunmadığı için, konum bilgisi *IfcSite* nesnesi içindeki *RefLatitude*, *RefLongitude*, *RefElevation* alanları ile birlikte *TrueNorth* ve *WorldCoordinateSystem* kullanılarak verilmelidir. Buna ek olarak, Koordinat Referans Sistemi (*Coordinate Reference System*, CRS) tanımı ve dönüşüm parametreleri (örn. EPSG kodu, epoch, datum, ofset, yön ve ölçek değerleri) *Pset_GeoReference* adlı bir özellik kümesi içinde tekrarlanmalı ve bu küme *IfcProject* veya *IfcSite* seviyesinde ilişkilendirilmelidir [239].

Şekil 5.26 LoGeoRef50 UML Diyagramı [186]



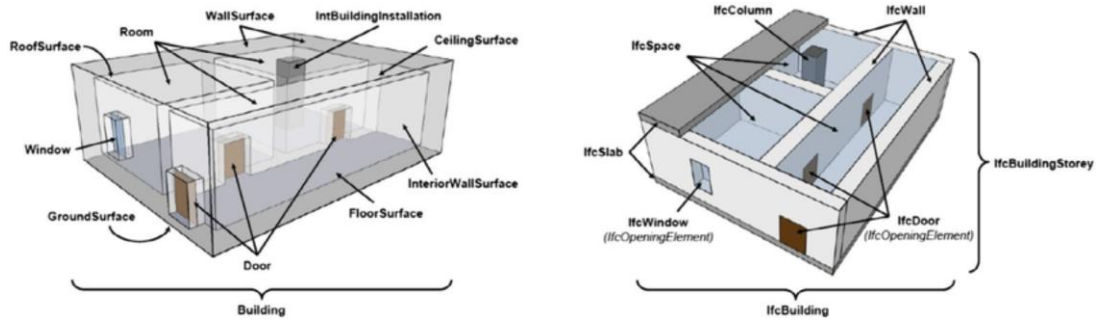
5.5.1.1 LOD Dönüşümü

Temel görev her bir LoD seviyesi için hangi yapı bileşenlerinin korunacağına veya sadeleştirileceğine karar vermektir. BIM modelleri LOD100'den LOD500'e kadar bir binanın bileşenlerini yüksek detay bilgileriyle tanımlar. Modellerin veri

boyutu yüksek olduğu için aktarım öncesinde dönüşüm amacına uygun olarak sadeleştirme işlemlerinin yapılması gerekir. Sadeleştirme işlemi özellikle IFC tabanlı BIM modellerinin CityGML formatındaki CBS sistemlerine entegre edilmesinde kritik bir adımdır [233].

CityGML formatı, LoD1'den LoD4'e kadar bir bina modelinin farklı detay seviyelerini tanımlar. Hangi seviyenin kullanılacağı ise büyük ölçüde kullanım senaryosuna bağlı olarak belirlenmektedir [234].

Şekil 5.27 CityGML (sol) ve IFC Veri Modellerinin (sağ) Karşılaştırılması [240]



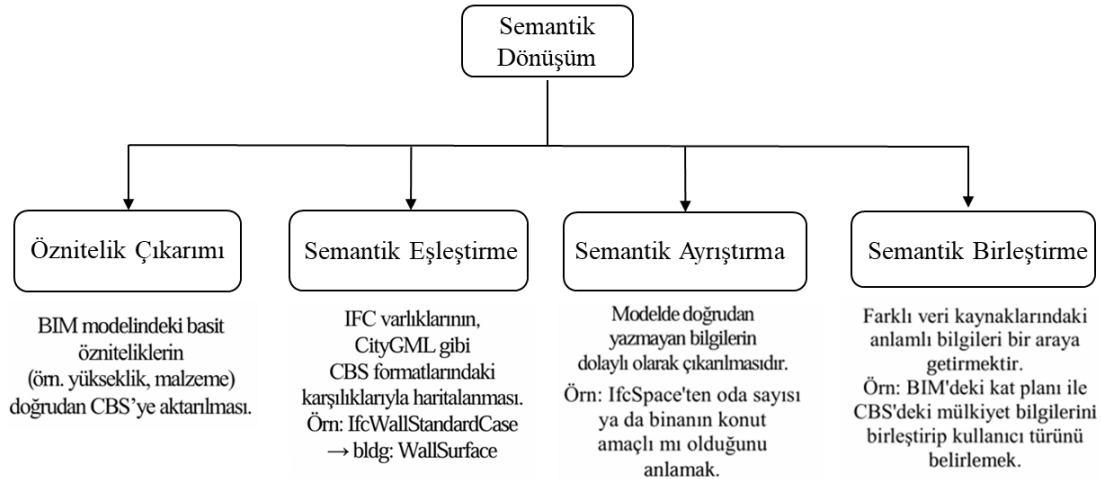
Ancak aktarım süreci sadece detay düzeyiyle sınırlı değildir. BIM modellerinde yer alan varlıklar, genellikle çok sayıda ve çeşitlidir. IFC yapısı içerisinde kiriş, kolon, merdiven gibi elemanlar ayrı ayrı sınıflarda tanımlanır. CityGML tarafında ise bu tür bileşenlerin tamamı çoğu zaman “*BuildingInstallation*” başlığı altında bir arada temsil edilir. Bu durum IFC'de açıkça ayrılmış en az yedi sınıfın CityGML’de tek bir yapıya indirgenmesine neden olur. Ayrıca indirgeme işlemi, verinin semantik değerini düşürerek yorumlamayı zorlaştırabilir [241].

CityGML'deki genel sınıfların IFC tarafındaki hangi varlıklarla eşleştirileceği de her zaman net değildir (Şekil 5.27). Birebir eşleşme yapılması gereken durumlarda otomatik çözümler yetersiz kalmakta bu da manuel eşleştirme işlemlerini zorunlu hâle getirmektedir. Kiriş, kolon veya merdiven gibi elemanları otomatik olarak tanıyıp doğru sınıfa yerleştirebilen algoritmaların yaygınlaşması dönüşüm sürecinin verimliliğini önemli ölçüde artıracaktır [242].

5.5.1.2 Semantik Düzeyde Dönüşüm

Semantik kavramı BIM için, yapı bileşenlerinin türü, kullanılan malzeme, işlevi gibi öznitelik bilgilerini ve bu bileşenler arasındaki ilişkileri ifade eder.

Şekil 5.28 Semantik Dönüşüm Aşamaları [233]



Literatürde, BIM verilerinin CBS sistemlerine entegre edilmesi sürecinde kullanılan dört temel semantik aktarım yöntemi öne çıkmaktadır: Öznitelik Çıkarımı (*Attribute Extraction*), Semantik Eşleme (*Semantics Mapping*), Semantik Çıkarım (*Semantics Extraction*) ve Semantik Birleştirme (*Semantics Merging*) (Şekil 5.28). Bu yöntemler BIM ve CBS sistemleri arasında bilgi bütünlüğünün sağlanması ve anlamsal uyumluluğun kurulması açısından kritik öneme sahiptir [228].

5.5.1.3 Öznitelik Çıkarımı

Entegrasyon için ilk adım IFC formatındaki yapı bilgisinin çözümlenerek uygulamalar tarafından işlenebilir hale getirilmesidir. Literatürde bu sürece “*parsing*” (ayırıştırma) adı verilir (Şekil 5.29). IFC dosyaları, EXPRESS, XML veya JSON gibi metin tabanlı yapılarda hazırlanmış olsa da içerdiği veriler doğrudan sorgulanabilir veya analiz edilebilir olmadığı için nesne modeli (*object model*) adı verilen daha yapısal bir forma dönüştürülerek BIM nesnelere benzersiz tanımlayıcılar (GUID) veya nesne sınıfları (örneğin *IfcWall*, *IfcDoor*) üzerinden erişilmesini sağlarlar [238].

Ayrıştırma adımından sonra gerçekleştirilen öznitelik çıkarımı, semantik aktarımın en basit ve esnek yöntemlerinden biridir. Bir CBS uygulamasının BIM içindeki tüm veriye ihtiyaç duymayacağı durumlarda yalnızca analiz için gerekli görülen öznitelikler seçilerek aktarılır. Örneğin bazı çalışmalarda yalnızca iç mekân yön bulma için gerekli olan duvar, döşeme, pencere ve mekân gibi temel yapı bileşenleri korunmuştur [180]. Başka bir çalışmada ise inşaat tedarik zinciri yönetimini kolaylaştırmak amacıyla yalnızca yapı elemanlarının tür ve miktar bilgileri çıkarılmıştır [243]. Genellikle IFC verisinin semantik yapı içermeyen Shapefile gibi formatlara dönüştürülmesi durumlarında tercih edilmektedir.

Şekil 5.29 (a) IFC Verisini Ayrıştıran Python kodu ve (b) Tabloya Dönüştürülmüş Çıktısı [238]

```
a) for object in objects:
    psets = Element.get_psets(object, psets_only=True)
    add_pset_attributes(psets)
    qtos = Element.get_psets(object, qtos_only=True)
    add_pset_attributes(qtos)
    object_id=object.id()
    objects_data.append({
        "ExpressId": object.id(),
        "GlobalId":object.GlobalId,
        "Class":object.is_a(),
        "PredefinedType":Element.get_predefined_type(object),
        "Name":object.Name,
        "Level":Element.get_container(object).Name
        if Element.get_container(object)
        else "",
        "ObjectType":Element.get_type(object).Name
        if Element.get_type(object)
        else "",
        "QuantitySets":qtos,
        "PropertySets":psets,
    })
return objects_data,list(pset_attributes)
```

```
b) #39=IFCPROPERTYSINGLEVALUE('FireRating',$.IFCLABEL('60'),$);
#42=IFCLOCALPLACEMENT('#12626,#262543);
#88=IFCPROPERTYSINGLEVALUE('LoadBearing',$.IFCBOOLEAN(F),$);
#153=IFCWALL('00oZxkymyIBhCBmXyRiqV',#1,'Separation wall (non LB)',
$.S,$254883,#270917,00CA3EE-B7CC-3C48-BACC-2F087C6ECD1F);
#72918=IFCCARTESIANPOINT(23625.0,15200.0,0.0);
#100793=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#72918,#4,#12);
#100793=IFCSHAPEREPRESENTATION(#3,'Body','Brep',(#98152,#98153));
#333140=IFCPROPERTYSET('29ZWSPA2DmB2pS0Vk5pCwg',#1,'Pset_WallCommon',$.($39,#88,#27));
```

(b)	GlobalId	Class	PredefinedType	Name	Level	ObjectType	GrossSideArea
00oZxkymyIBhCBmXyRiqV	IfcWall	STANDARD	Separation wall (non LB)	01 First floor	Separation wall	59,9064	
0Kx7WcQm_GOSWhM4zDFZ	IfcWall	STANDARD	Separation wall (non LB)	01 First floor	Separation wall	50,723652	
1W3T6mmG9qjRx8\$zh5oUqj	IfcWall	STANDARD	Separation wall (non LB)	00 Ground floor	Separation wall	36,5636	
3rhRuQuinHHBg4ntrur0S7	IfcWall	STANDARD	Separation wall (non LB)	01 First floor	Separation wall	36,5586	
1_RpZg_ItqGRbcbvBOMGtM	IfcWall	STANDARD	Separation wall (non LB)	00 Ground floor	Separation wall	23,49135225	

5.5.1.4 Semantik Eşleştirme

Semantik eşleme, IFC ile CBS veri modelleri arasında bilgi bütünlüğünü korumak için kritik bir adımdır. BIM modellerinde yer alan nesne açıklamaları, sınıf bilgileri ve ilişkisel yapıların CBS tarafına eksiksiz biçimde aktarılabilmesi için, kaynak sistemdeki sınıfların hedef sistemdeki karşılıklarıyla eşleştirilmesi gerekir. CityGML, duvar, çatı, pencere gibi yapı bileşenleri için önceden tanımlı sınıflar ve ilişkiler sunan gelişmiş bir semantik modeldir. IFC'deki varlık sınıflarının

CityGML'deki karşılıklarıyla eşleştirilmesi, doğru ve tutarlı bir aktarım için zorunludur. Bazı durumlarda bu eşleme yeterli olmayabilir. Böyle durumlarda CityGML, ADE yöntemiyle genişletilerek IFC'deki kavramların eksiksiz biçimde karşılanması sağlanır [233].

Shapefile gibi daha basit veri yapılarında sınıf temelli bir model bulunmadığından, doğrudan öznitelik aktarımı mümkündür. Ancak bu yaklaşım semantik bağlamı korumadığı için kapsamlı CBS uygulamaları açısından yetersiz kalabilir. Aktarım sürecinin başarısı, büyük ölçüde hedef sistemin veri modelinin karmaşıklığına ve sunduğu sınıf yapısına bağlıdır. Nitelikli bir sınıf eşlemesi yalnızca teknik veri aktarımını değil semantik bütünlüğü de güvence altına alır [233].

5.5.1.5 Semantik Çıkarım ve Birleştirme

Entegrasyon aşamalarında verilerin biçimsel olarak dönüştürülmesinin yanında kavramların, sınıfların, özelliklerin ve aralarındaki ilişkilerin de anlamlı şekilde eşleştirilmesi gerekir. Semantik Çıkarım, her iki sistemde ortak olan kavramların belirlenerek ayrıştırılmasını ve bunların üzerine yeni bir veri modelinin inşa edilmesini hedefler. Yalnızca ortak kavramlara odaklanmak yeterli olmaz. Semantik Birleştirme, BIM ve CBS sistemlerinde yer alan birbirinden farklı ama birbiriyle tamamlayıcı kavramların da birleştirilmesi yaklaşımıdır. Semantik web teknolojilerinden faydalanılarak, BIM ve CBS'e özgü kavramlar tek bir ontoloji yapısı altında bir araya getirilir. Ontolojiler, her iki sistemdeki sınıfları, ilişkileri ve nitelikleri tanımlayan kavramsal çerçevelerdir. Genellikle Kaynak Tanımlama Çerçevesi (*Resource Description Framework, RDF*)¹⁸ gibi standartlar kullanılarak modellenir. Bu yaklaşımlarla BIM ve CBS verileri anlam açısından tutarlı, birlikte sorgulanabilir ve makine tarafından okunabilir hâle gelir [233].

5.6 BIM ve CBS'nin Entegrasyonuna Yönelik Veri Aktarım Yaklaşımları

BIM ve CBS sistemlerinin entegrasyonu, genel olarak üç temel kategori altında ele alınır: BIM'den CBS'ye dönüşüm, BIM ile CBS'nin birleştirilmesi ve CBS'den

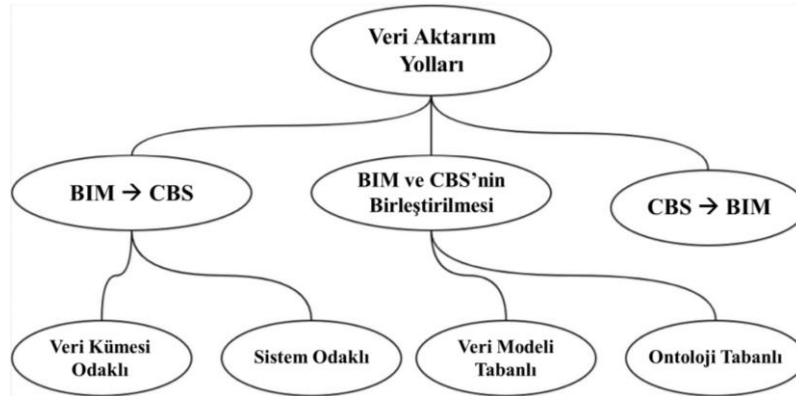
¹⁸ **RDF**, verilerin özne-yüklem-nesne üçlülere (subject-predicate-object) biçiminde tanımlanmasını sağlayan semantik bir veri modelidir.

BIM'e dönüşüm. Bu kategoriler literatürde çoğu zaman veri odaklı, sistem odaklı ve semantik odaklı yaklaşımlar olarak çerçevelendirilir [233].

BIM'den CBS'ye geçişte iki farklı yol öne çıkar. Bunlardan ilki, BIM veri kümelerinin CBS veri kümelerine dönüştürülmesini esas alan Veri Kümesi Odaklı Yaklaşım'dır (*Dataset-Oriented Path*). IFC formatındaki BIM verileri Shapefile, GML ya da CityGML gibi CBS formatlarına aktarılır. Diğer yol ise BIM verilerinin doğrudan bir CBS sistemine entegre edilmesini amaçlayan Sistem Odaklı Yaklaşım'dır (*System-Oriented Path*). Bu başlık altında, veri dönüştürmeden sistemleri birlikte çalıştırmaya odaklanan Uygulama Düzeyinde Entegrasyon ve Hizmet Tabanlı Yöntemler yer alır. Uygulama düzeyindeki entegrasyon ArcGIS Pro gibi platformlarda BIM ve CBS verilerinin eşzamanlı kullanılmasını mümkün kılar. Hizmet Tabanlı Yaklaşımlar ise OGC'nin sunduğu WFS-T gibi servisler aracılığıyla sistemler arası süreç etkileşimini sağlar [233].

BIM ile CBS'nin Birleştirilmesi altında ise iki yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki her iki sistemden ortak kavramların türetildiği Veri Modeli Temelli Yöntemdir (*Data-Model-Based Path*). Şema Genişletme yöntemi bu başlık altına dâhil edilebilir. İkincisi ise BIM ve CBS'ye özgü kavramların ontolojiler aracılığıyla bütünleştirildiği ontoloji temelli yaklaşımdır (*Ontology-Based Path*). Veri aktarım yollarının genel görünümü Şekil 5.30'de özetlenmektedir.

Şekil 5.30 BIM'den CBS'ye Dönüşümdeki Veri Aktarım Yolları [233]



5.6.1 Veri Kümesi Tabanlı Yaklaşım

Veri kümesi odaklı yaklaşım, BIM verilerinin (özellikle IFC formatındaki modellerin), CBS'nin kullandığı Shapefile, CityGML, CityJSON gibi veri formatlarına dönüştürülmesine dayanır. BIM bilgisi biçim değiştirerek CBS ortamında saklanabilir hâle getirilir. Yaklaşımın temelinde, BIM'in erken aşamalarda veri üretimi ve yönetimi için CBS'nin ise analiz, paylaşım ve arşivleme gibi sonraki aşamalar için kullanılması yer alır. BIM, bu açıdan bakıldığında CBS için bir veri kaynağı haline gelir [244]. Dönüşüm süreci üç temel adım içerir: IFC dosyasının ayrıştırılması, gerekli bilgilerin dönüştürülmesi ve bu bilgilerin CBS'nin okuyabileceği formatta kaydedilmesi.

IFC→Shapefile dönüşümünde, katı modeller kolayca *multipatch*¹⁹ olarak aktarılır ve semantik bilgiler ayrı tablolarla yönetilebilir. Ancak topolojik ilişkilerin temsilinde yetersizdir ve detaylı BIM modelleri için sadeleştirme gerekebilir [245].

IFC→CityGML dönüşümü daha karmaşıktır. Katı modellerin yüzey temsiline dönüştürülmesi ve semantik eşleşmelerin titizlikle yapılması gerekir. BIM–CBS entegrasyonunda en yaygın ama teknik olarak en zorlu yöntemdir [246].

IFC→GML dönüşümü ise daha esnektir. GML, geometrik ve semantik bilgileri destekleyen bir standart olduğundan dönüşüm süreci daha kolaydır. Ancak bazı çalışmalar GML dönüşümünü yanlışlıkla CityGML olarak tanımlayabilmektedir [233].

5.6.2 Veri Modeli Tabanlı Yaklaşımlar

IFC'nin sunduğu zengin semantik bilgi içeriğinden yalnızca ilgili CBS uygulamasında gerçekten gerekli olan kısımlar seçilir ve bu bilgilerle özel kavramsal veri modelleri oluşturulur. BIM ve CBS verileri bu modellerde bir araya getirilir. Veri modeli tabanlı yaklaşım pek çok çalışmada kullanılmıştır. Örneğin, iç mekân yön bulmaya yönelik BIM Yönelimli Kapalı Alan Veri Modeli (*BIM Oriented Indoor Data Model, BO-IDM*) geliştirilmiştir. Benzer şekilde, binaların temel bileşenlerini içeren

¹⁹ **Multipatch**, CBS ortamlarında üç boyutlu katı veya yüzey modellerin tutulmasını sağlayan bir geometri türüdür. Özellikle ArcGIS gibi sistemlerde BIM verilerinin görselleştirilmesi ve analizi için kullanılır.

yalın bir core building model tasarlanmıştır. Birleşik Bina Modeli (*Unified Building Model, UBM*) ise BIM ve CBS arasında semantik düzeyde iki yönlü bilgi alışverişini mümkün kılmak üzere önerilmiştir. Ayrıca taşkın hasar analizi için özel olarak (*Flood Damage Assessment, FDA*) modeli oluşturulmuştur [240].

Genellikle UML ile tanımlanan bu yapılar pratikte Shapefile, GML veya Geodatabase gibi formatlara dönüştürülerek kullanılır. Örneğin BO-IDM, UBM ve core modelleri Shapefile ve geodatabase biçiminde, FDA modeli ise GML formatında uygulanmıştır. Ancak bu yöntem çoğu zaman belirli projelere özgü modellere dayanır ve genelleştirilebilirliği sınırlıdır.

5.6.3 Şema Genişletme Yaklaşımı

Şema genişletme yaklaşımı, mevcut veri modeline yeni sınıflar ve özellikler ekleyerek farklı veri türlerini tek bir yapı altında bütünleştirir. Genellikle nesne yönelimli modelleme prensiplerine dayanır ve modelin hem esnekliğini artırır hem de veri bütünlüğünü korur. IFC ile CityGML arasındaki yapısal ve anlamsal uyumsuzlukları azaltmak amacıyla önerilen UBM, bu yöntemin dikkat çeken örneklerinden biridir [205]. UBM modelinde sınıflar birlikte değerlendirilmiş, ortak kavramlar birleştirilmiş ve eksik kalan alanlar için yeni nesneler eklenmiştir. Ortaya çıkan yapı, UML tabanlı şemalarla tanımlanmıştır. UBM, doğrudan format dönüşümüne göre bilgi kaybını en aza indirirken, modeller arasında daha güçlü bir anlamsal uyum sağlar. Model, iç ve dış mekâna ait verilerin aynı anda analiz edilebildiğini göstermiştir. Bu özelliğiyle afet yönetimi gibi çok kaynaklı veri gerektiren uygulamalarda etkili bir entegrasyon zemini sunar. Öte yandan şema yeterince soyut ve esnek değilse, kavramsal çakışmalar ve karmaşık sınıf yapıları nedeniyle yönetimi zorlaşabilir [170].

5.6.4 Sistem Tabanlı Yaklaşımlar

BIM-CBS entegrasyonunda, veri seti temelli dönüşüm yöntemlerinin özellikle CityGML gibi katı şemalara uyum sağlama zorunluluğu nedeniyle karmaşık hale gelmesi, alternatif yaklaşımların geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Sistem tabanlı yöntemler, BIM verilerini kalıcı olarak dönüştürmek yerine, doğrudan uygulama

ortamında geçici olarak işleyip görselleştirmeyi esas alır. Bu yaklaşım, özellikle görselleştirme öncelikli uygulamalarda pratiklik sağlarken, Grafik İşlemci Ünitesi (*Graphics Processing Unit, GPU*)²⁰ destekli sistemlerin kullanımını da zorunlu hale getirir [247].

Sistem tabanlı modellerin temel avantajı hem BIM hem de CBS sistemlerinin grafik tabanlı teknolojilerle (ör. OpenGL²¹, WebGL²²) çalışabilmesidir. Süreç genel hatlarıyla şu adımlardan oluşur: BIM veya CBS verisinin analiz edilerek ayrıştırılması, bu verinin GPU'nun yorumlayabileceği ara formatlara dönüştürülmesi ve son olarak bu bilgilerin üç boyutlu olarak işlenmesidir [247].

Bu noktada "ara format" ifadesi, köşe noktaları (*vertex*), yüzey indeksleri, yüzey normalleri ve renk bilgisi gibi temel geometri bileşenlerinin GPU dostu yapılara (örn. WebGL buffer'ları veya OGC 3D Tiles'in b3dm formatı²³) dönüştürülmesini ifade eder [233].

Sistem tabanlı yaklaşımların ortak özellikleri arasında IFC modellerinin web platformlarında dinamik olarak işlenmesi, geometri ve anlamsal bilgilerin ayrı veri tabanlarında saklanması ve bu bilgiler arasındaki ilişkilendirmenin benzersiz tanımlayıcılar (ID) aracılığıyla sağlanması öne çıkar. Ancak bu yöntem veriyi yalnızca oturum süresince işlediğinden, kalıcı analiz ve uzun vadeli veri yönetimi için yeterli değildir. Yine de yüksek performans gerektiren kısa süreli uygulamalar açısından oldukça etkilidir [233].

5.6.5 Uygulama Tabanlı Yaklaşımlar

Uygulama düzeyindeki entegrasyonlarda, veri dönüşümlerinin ötesine geçen sistem çözümleri üretilmektedir. Teknik olarak veri dönüştürülmesine gerek kalmadan

²¹ **OpenGL (Open Graphics Library):** OpenGL, platform bağımsız ve endüstri standardı bir grafik API'sidir. 2B ve 3B grafiklerin donanım hızlandırılmalı olarak çizilmesini sağlar ve özellikle CAD, GIS ve görselleştirme yazılımlarında yaygın olarak kullanılır.

²² **WebGL (Web Graphics Library):** WebGL, tarayıcı tabanlı uygulamalarda 3B grafiklerin doğrudan donanım üzerinden çizilmesini sağlayan bir JavaScript API'sidir.

²³ **b3dm (Batched 3D Model):** b3dm, OGC 3D Tiles standardının bir alt formatıdır ve büyük ölçekli 3B bina modellerinin veya şehir verilerinin bir arada gruplanarak (batched) verimli biçimde aktarılmasını ve istemcide hızlı görselleştirilmesini sağlar. İçerisinde geometrik bilgiye ek olarak semantik bilgiler ve öznitelikler de taşınabilir, bu da BIM verilerinin web tabanlı ortamlarda etkili şekilde sunulmasına olanak tanır.

yazılımlar üzerinden birlikte çalıştırılması anlamına gelir. Veriler birbiri ile uyumlu olmasa bile kullanıcı arayüzleri, eklentiler, API'ler veya bulut tabanlı platformlar üzerinden eş zamanlı olarak analiz, görselleştirme ve karar destek gibi işlevler sağlanır. Örneğin ArcGIS Pro'nun Revit dosyalarını doğrudan açabilmesi, Autodesk InfraWorks'te hem BIM hem CBS katmanlarının görselleştirilmesi, FME Workbench ile CBS ve BIM verilerini aynı iş akışında kullanmak.

CBS ve BIM teknolojileri belirli projelerde bir arada çalıştırılarak analiz süreçleri bütünleştirilmektedir. Örneğin, bazı uygulamalarda yapı modelleri CBS verileriyle eşleştirilmiş ve en uygun tedarikçiyi belirlemeye yönelik analizler yürütülmüştür [171]. Bir başka çalışmada, BIM'den yapı detaylarını alırken, CBS aracılığıyla lojistik süreci izleyip görselleştirmiştir. Böylece her iki sistem inşaat tedarik zinciri sürecinde tamamlayıcı şekilde konumlandırılmıştır. Bunun dışında sistemlerin işlevselliğini artırmak adına özel yazılım eklentileri geliştirilmekte ve bir sistemin bazı yetenekleri doğrudan diğerine entegre edilmektedir. Bu tür çözümler veri düzeyinde sağlanan teknik uyumun üzerine inşa edilerek daha gelişmiş bir birlikte çalışabilirlik sunmaktadır [169].

5.6.6 Hizmet Tabanlı Yaklaşımlar

BIM ve CBS sistemlerinin entegre çalışabilmesi için geliştirilen yöntemlerden biri de hizmet tabanlı yaklaşımdır. İnternet üzerinden çalışan bu modelde, farklı sistemler arasında veri formatını dönüştürmeden doğrudan süreç düzeyinde etkileşim kurulabilir. OGC'nin geliştirdiği OWS-4 projesi²⁴ buna güçlü bir örnek sunar. IFC ve CityGML verileri, WFS-T²⁵ gibi mevcut servisler kullanılarak entegre edilmiş CBS uygulamaları, BIM içerikleri ve 3B görüntüleyiciler tek bir ortamda birlikte işletilmiştir. Şehir verilerinin web tabanlı olarak yönetilmesi bu şekilde mümkün hâle gelirken, özellikle afet yönetimi gibi karmaşık senaryolarda mekânsal ve yapısal bilgilerin birlikte değerlendirilmesi karar destek süreçlerini önemli ölçüde

²⁴ **OWS-4 Projesi**, OGC'nin OWS-4 projesi, BIM verilerinin CBS ortamına entegrasyonunu test etmek amacıyla yürütülmüş bir çalışmadır. Bu kapsamda, mevcut OGC web servislerinin (örneğin WFS) IFC ve CityGML verilerini destekleyebileceği ve yeni bir servis türü geliştirmeye gerek kalmadan BIM-CBS entegrasyonunun sağlanabileceği ortaya konmuştur.

²⁵ **WFS-T** (Transactional Web Feature Service), BIM verilerinin web üzerinden sadece görüntülenmesini değil, aynı zamanda düzenlenmesini (ekleme, silme, güncelleme) mümkün kılan OGC tabanlı bir web servsidir. IFC ve CityGML gibi veri formatlarının CBS sistemlerine entegre edilerek çevrim içi olarak yönetilmesini sağlar.

güçlendirmiştir [174]. Semantik ve geometrik açıdan yüksek doğruluk sağlayan bu yöntem, uygulamalarda ciddi bir avantaj yaratır. Yine de işlem süresi, sistem esnekliği ve maliyet açısından bazı teknik sınırlarla karşılaşabilmektedir. Tüm sınırlamalara rağmen, hizmet tabanlı yapılar, 3B şehir modelleme ve disiplinler arası mekânsal analizler için güçlü bir altyapı sunar.

5.6.7 Ontoloji Tabanlı Yaklaşımlar

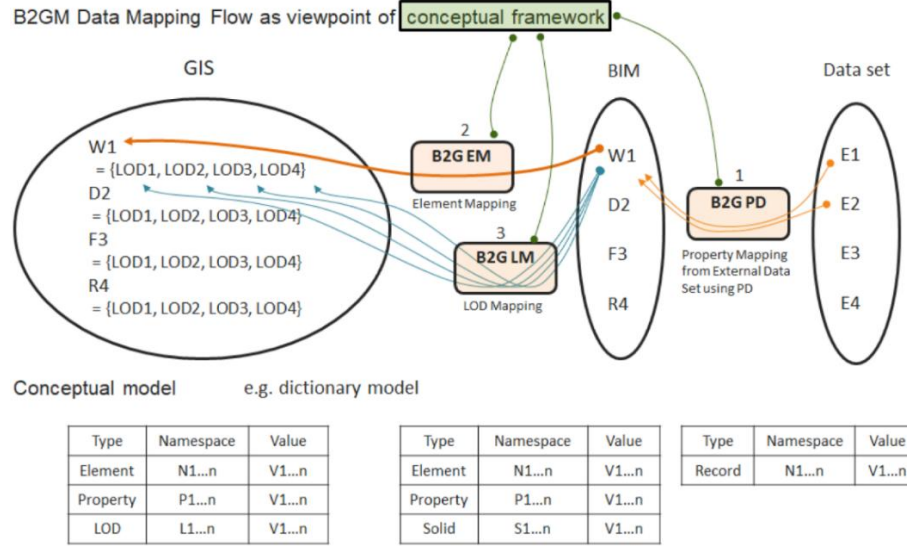
Ontoloji, bilgisayar bilimlerinde belirli bir alandaki varlıkları, kavramları ve bunlar arasındaki ilişkileri tanımlamak amacıyla kullanılan bir veri modelidir. BIM ve CBS sistemleri arasında sıklıkla karşılaşılan anlamsal uyumsuzluk (*semantic mismatch*) sorununu çözmeyi hedefleyen ontoloji tabanlı yaklaşımlar, verilerin yalnızca geometrik değil anlamsal bakımdan da kayıpsız biçimde dönüştürülmesini sağlar. İlk olarak, BIM ve CBS alanlarına ait kavramlar ve ilişkiler belirlenerek her biri için ayrı ontolojiler oluşturulur. Ardından ortak kavramlar tanımlanarak bu iki ontoloji birleşik bir yapıda birleştirilir ve bu yapı, RDF ve OWL (*Web Ontology Language*) gibi ontoloji tanımlama dilleriyle modellenir. Daha sonra BIM ve CBS verileri, bu ontolojiye uygun şekilde RDF üçlülere (subject–predicate–object) biçiminde ifade edilir ve bu yapılar SPARQL gibi sorgulama dilleriyle analiz edilebilir. Literatürde bu yöntem, zaman zaman Semantik Web Tabanlı (*Semantic Web-Based*) ya da Bağlantılı Veri (*Linked Data-Based*) Yaklaşımı olarak da adlandırılmaktadır [213]. Yöntemdeki temel sınırlılık ise yalnızca semantik dönüşüme odaklanmasıdır. Geometrik verilerin aktarımı bu yaklaşımda kapsam dışı kalmaktadır.

5.6.8 ISO 19166’ya göre Entegrasyon

ISO 19166 standardı “*Geographic Information – Conceptual Mapping between BIM and GIS (B2GM)*”, ISO/TC 211 teknik komitesi tarafından geliştirilmiştir. BIM verilerinin CBS ortamlarında kullanılmasını kolaylaştırmaya yönelik açık, sistematik bir kavramsal eşleme yöntemi sunmaktadır. Standardın amacı, BIM ile CBS arasındaki kavramsal farkları azaltarak şehir ölçeğinde nesne eşleşmelerini kullanıcı senaryolarına göre tanımlamak, veri kayıplarını önlemek ve entegrasyon sürecini kullanıcı tarafından yönetilebilir kılmaktır. B2GM yaklaşımı, üç temel bileşen

üzerinden tanımlanır: “B2GM-EM (*Element Mapping*), B2G-LM (*LOD Mapping*) ve B2G-PD (*Perspective Definition*)” [248].

Şekil 5.31 Kavramsal Eşleme Yapısı ve Bileşenler Arası Etkileşim [170]



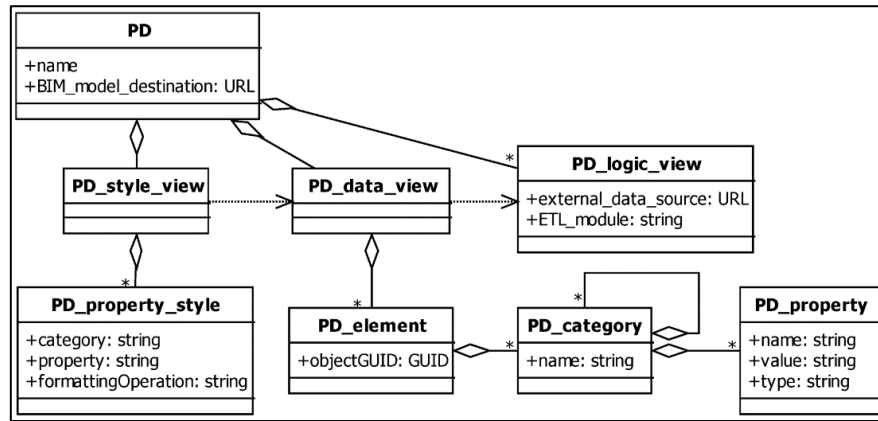
BIM tarafındaki dış veri kümesinden alınan özellikler (ör. E1–E3), önce Özellik Sözlüğü aracılığıyla PD üzerinde eşleştirilir. Daha sonra bu özellikler ilgili yapı elemanlarıyla birlikte CBS ortamındaki karşılıklarıyla EM üzerinden ilişkilendirilir. Son aşamada ise her eleman uygun LoD düzeyiyle eşleştirilerek LM üzerinden GIS modeline aktarılır. Süreç boyunca kavramsal modelde yer alan bileşenler “*Type*”, “*Namespace*” ve “*Value*” alanlarına dayalı sözlük modeliyle tanımlanır. B2GM dönüşümünde bu yapı, kavramsal tutarlılık ve anlamlı eşleşmelerin sağlanması için temel bir çerçeve sunar (Şekil 5.31).

5.6.8.1 B2G-PD: Bilgi Görünümü Tanımı

B2G-PD bileşeni, BIM ile CBS sistemleri arasındaki veri bağlamını, belirlenen kullanım senaryolarına göre düzenlemek amacıyla tasarlanmıştır. Hangi bilginin hangi kaynaktan alınacağı, nasıl dönüştürüleceği ve hangi formatta sunulacağı gibi sorulara yanıt veren kurallı bir yapı oluşturur. Kavramsal açıdan buildingSMART’ın MVD yaklaşımıyla benzerlik gösterse de verinin eşlenmesi, dönüştürülmesi ve sunulması aşamalarını da tanımlar [170].

B2G-PD, işlevsel olarak üç alt bileşenden oluşur: Veri Görünümü (*Data View*), Mantıksal Görünüm (*Logic View*) ve Stil Görünümü (*Style View*). Her biri farklı bir bilgi işleme düzeyini temsil eder ve UML tabanlı şema ile yapısal ilişkileri açıkça modellenmiştir (Şekil 5.32). Tasarımın sağladığı bütünlük, farklı sistemlerden gelen verilerin (*PD_logic_view*) BIM öğeleriyle (*PD_element*) eşleştirilmesini, verilerin düzenlenmesini (*PD_data_view*) ve son kullanıcıya biçimlendirilmiş şekilde sunulmasını (*PD_style_view*) mümkün kılar [170].

Şekil 5.32 B2G-PD için UML Diyagramı [170]



Veri Görünümü (*PD_data_view*), BIM modelinden hangi nesnelerin ve özelliklerin çıkarılacağını belirler. Her görünüm, *PD_element* aracılığıyla belirli bir nesneye bağlanır ve bu nesne genellikle objectGUID gibi birincil anahtar ile tanımlanır. Görünümler, kategoriler (*PD_category*) altında gruplanır. Her kategori ise belirli nitelikleri (*PD_property*) içerir. Nitelikler; ad, değer ve veri türü (ör. *integer*, *real*, *string*) ile birlikte tanımlanır. Metaveri ve işlem tanımları kullanılarak verilerin sınıflandırılması ve standartlara uygun hale getirilmesi ile çok disiplinli kaynaklar uyumlu biçimde entegre edilebilir [170].

Mantıksal Görünüm (*PD_logic_view*), dış veri kaynaklarının BIM modeliyle nasıl entegre edileceğini tanımlar. *external_data_source* niteliği ile harici sistemlere erişim sağlanır ve URL üzerinden bağlantılar kurulur. *ETL_module* ögesi ise verinin çıkarılması (*Extract*), dönüştürülmesi (*Transform*) ve yüklenmesi (*Load*) işlemlerini yöneten mekanizmadır. Kurulan bu yapı ile farklı sistemlerde dağınık hâlde bulunan bilgiler BIM ve CBS ortamında bir araya getirilebilir. Tüm süreç boyunca veriler,

objectGUID gibi tanımlayıcılar üzerinden kaynak modeldeki öğelerle ilişkilendirilir [170]. Farklı kaynaklardan gelen bilgiler tekil nesnelerle eşleştirilerek tutarlı ve merkezi bir veri yapısı oluşturulur.

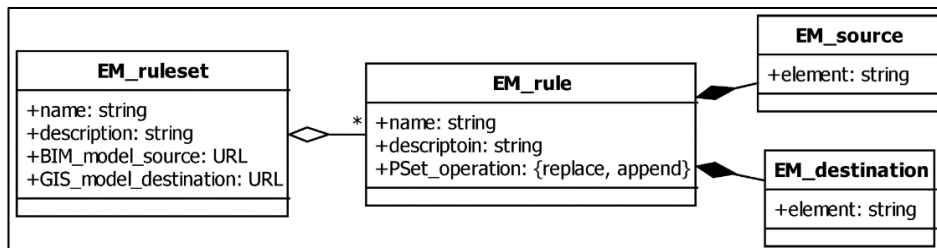
Stil Görünümü (PD_style_view), verilerin kullanıcıya nasıl sunulacağını belirleyen son katmandır. Görselleştirme biçimleri bu yapı üzerinden yönetilir ve her veri için *category*, *property* ve *formattingOperation* bilgileri *PD_property_style* sınıfı aracılığıyla tanımlanır. Örneğin bir duvarın yangına dayanıklılık sınıfı özelliği, yüksek risk taşıyan değerlerde kırmızı renkle, düşük riskli olanlar ise yeşil tonlarında gösterilebilir [170]. Kullanıcıların verileri bağlamsal olarak daha hızlı yorumlamasını ve karar destek süreçlerinde etkin biçimde kullanmasını sağlar.

B2G-PD yapısında *PD_element*, *PD_category*, *PD_property* ve *PD_property_style* bileşenleri, verilerin tanımlanması ve görsel sunumu için birlikte çalışır. *PD_element* benzersiz kimliğiyle nesneyi temsil eder. Özellikler *PD_category* altında gruplanır ve *PD_property* ile tanımlanır. *PD_property_style* ise bu özelliklerin nasıl görselleştirileceğini belirler [170].

5.6.8.2 B2G-EM: Nesne Eşleme Bileşeni

B2G-EM, veri yapılarından kaynaklanan uyumsuzlukları azaltmak için sistematik bir eşleme mekanizması sunar. Bina, kat, duvar, pencere gibi temel yapı öğelerinin BIM modelinden CBS modeline nasıl aktarılacağını tanımlayan bir dizi eşleme kuralı içerir. Kurallar, kullanım senaryosuna göre şekillenir ve bağlama bağlı olarak esnek biçimde değişebilir. Eşlemenin düzgün yapılabilmesi için CBS'deki LoD kavramı da dikkate alınmalıdır çünkü BIM'de tanımlanan bir duvar, kullanım amacına göre CBS tarafında LoD2 ya da LoD3 düzeyinde temsil edilebilir. Dönüşüm işlemleri, B2G-LM bileşeninden elde edilen LoD verileri temel alınarak yürütülmelidir [170].

Şekil 5.33 B2G-EM UML Diyagramı [170]

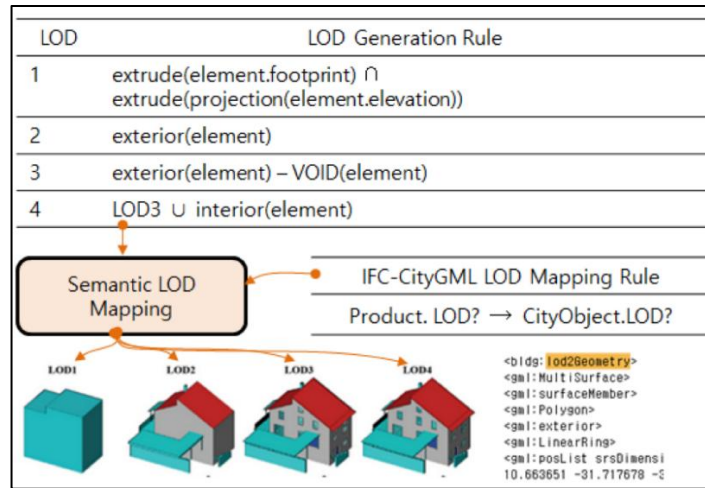


Şekil 5.33’da gösterilen diyagram, BIM ve CBS modelleri arasında eşlemelerin nasıl yapılandırıldığını nesne yönelimli bir modelleme dili üzerinden göstermektedir. Modelde bir *EM_ruleset*, birden çok *EM_rule* içerir. Her kural, kaynak (*EM_source*) ve hedef (*EM_destination*) elemanları ile kuralların nasıl uygulanacağını belirten *PSet_operation* tipini belirtilir. B2G-EM yapısı, kaynak ve hedef sistemler arasındaki eşleşmeleri UML aracılığıyla açık ve görsel olarak ortaya koyabilir. Veri senkronizasyonunun sağlıklı şekilde yürütülebilmesi için her iki sistemin URL üzerinden tanımlanması önerilmektedir. BIM modelinde yapılan her değişiklik, bu tanım yapısı sayesinde CBS tarafına doğrudan aktarılır ve veri bütünlüğü korunur [170].

5.6.8.3 B2G-LM: Detay Seviyesi Eşleme Bileşeni

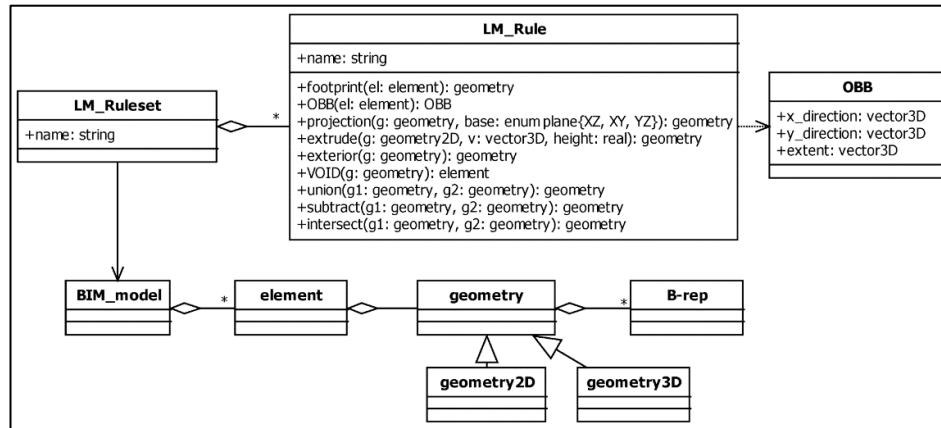
B2G-LM bileşeni, BIM modellerinden CBS’de kullanılan LoD temsillerinin anlamlı şekilde çıkarılmasını sağlar. LOD şemaları veri yoğunluğunu kontrol etmek ve 3B görselleştirmede sistemi rahatlatmak için kullanılır. Nesneler, çoğunlukla B-Rep temsiline dayalı yapılarla uygun detay seviyesinde sunulur [170].

Şekil 5.34 IFC–CityGML Dönüşümünde LOD Eşlemesinin Yapılışı [170]



BIM modelleri parametrik ve ayrıntılı bilgiler içerdiği için, CBS’deki LoD kavramıyla çoğu zaman birebir örtüşmez. IFC formatındaki bir bileşenin CityGML’de doğru sınıfa karşılık gelebilmesi, geometrik ve semantik yapısının dikkate alındığı dönüşüm kurallarının açık biçimde tanımlanmasını gerektirir (Şekil 5.34) [170].

Şekil 5.35 B2GM – LM UML Diyagramı [170]



Şekil 5.35’deki UML diyagramı, B2G-LM bileşeninin yapısını kavramsal düzeyde gösterir. Modelin merkezinde yer alan *LM_Ruleset* sınıfı, belirli bir dönüşüm senaryosu için tanımlanan eşleme kurallarını barındırır. Her bir kural, *LM_Rule* sınıfı ile temsil edilir ve BIM modelindeki geometrik öğelerin CBS ortamında uygun LOD seviyelerine dönüştürülmesini sağlar. *LM_Rule* içerisindeki işlemler izdüşüm alma, düzleme projeksiyon (örn. XZ, YZ, XY düzlemlerine yansıtma), yönlendirilmiş sınır kutusu (*Oriented Bounding Box*, *OBB*) oluşturma (nesnenin yönüne göre dönebilen kutu tanımlama) ve iki boyutlu geometriden hacim üretme (düz bir şekli yukarı doğru uzatarak 3B yapı oluşturma) gibi temel dönüşümleri kapsar. Birleşim, fark ve kesişim gibi küme tabanlı işlemler ile içi boş alanların (*void*) tanımlanması da dönüşüm sürecine dâhildir. Diyagramın alt kısmında BIM modeli ile element ve geometri nesneleri arasındaki ilişki gösterilmiştir. Her BIM modeli 2B ya da 3B geometrilerle tanımlanan birden fazla yapı ögesi içerir. Geometriler B-Rep temsiline dayanır ve CBS tarafında kullanılacak LoD seviyelerine uygun biçimde işlenebilir. Örneğin, 2B geometriler hacme dönüştürülerek LoD2 veya LoD3 temsilleri oluşturulabilir. OBB sınıfı nesnelerin yön ve boyut bilgilerini *x_direction*, *y_direction* ve *extent* gibi vektör parametreleriyle ifade eder. Böylece dönüşümlerde geometrik tutarlılık sağlanır [170].

B2G-LM, geometrik sadeleştirme, semantik uyum, yön bilgisi ve ölçeklendirme gibi çok katmanlı dönüşümleri yöneterek BIM verilerinin CBS ortamına tutarlı biçimde aktarılmasını sağlar. Dönüşüm sürecinde köprü işlevi görür, hedef modele uyum sağlar ve veri bütünlüğünü korur.

BÖLÜM 6

BIM TEKNOLOJİSİNİN KENTSEL DÖNÜŞÜM VE AFET YÖNETİMİ SÜREÇLERİNE KATKILARININ İNCELENMESİ

Altıncı bölüm, sistematik literatür taramasıyla elde edilen bulgulara dayalı olarak düzenlenmiştir. İki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, kentsel dönüşüm projelerinde BIM kullanımının sunduğu faydalar ele alınmıştır. Bu projelerin diğer inşaat projelerinden farklı aşamalar içermesi nedeniyle süreçte yaşanan sorunlar tablo ile açıklanmıştır. BIM entegrasyonu sayesinde karbon ayak izi, enerji, su, malzeme kullanımı ve lojistik akışların erken aşamada ölçülebilir hâle geldiği, düşük emisyonlu tasarım ilkelerinin uygulanabilirliğinin arttığı ve kaynak yönetiminin optimize edilebildiği vurgulanmıştır. Ülkemizde kentsel dönüşüm ve yenileme projelerinin yoğun şekilde sürmesi, bu projelerin BIM ile yönetilmesinin stratejik önemini artırmaktadır. Karşılaşılan sorunlara yönelik BIM tabanlı çözüm önerileri sunulmuştur. Çok boyutlu yapısı sayesinde proje yaşam döngüsünün tasarım, inşaat, işletme ve yıkım aşamalarındaki katkıları değerlendirilmiştir. Ayrıca, proje yönetiminde karşılaşılan zorluklar tema ve alt temalar şeklinde sınıflandırılarak aktarılmıştır.

İkinci kısımda, ülkemizde en sık karşılaşılan afet türleri olan deprem, sel ve yangın senaryolarında bina odaklı olarak BIM'in kullanım potansiyeli ve bu süreçlerin yönetim biçimleri incelenmiştir. BIM-CBS entegrasyonunun afet yönetiminde sunduğu temel yetenekler ortaya konularak, risklerin önceden belirlenmesi ve buna bağlı yönlendirme ile tahliye stratejilerinin optimize edilebilmesi vurgulanmıştır. Afet yönetiminde BIM'in konumlandırılması, CBS ile entegrasyon yoluyla simülasyon çıktılarının üretilmesi, mekânsal analizlerin yapılması ve konum tabanlı planlamaların süreç verimliliğine katkıları açıklanmıştır. Sunulan şemalar aracılığıyla afet senaryosu görselleştirme, senaryo analizi ve veri değerlendirme odaklı yapı tanımlanmış, bu kapsamda acil durum tahliye süreçlerinde konum belirleme, rota oluşturma ve otomatik yol bulma işlevlerinin nasıl etkin biçimde yürütülebileceği gösterilmiştir. Literatürdeki vaka çalışmalarından elde edilen yangın tahliye senaryoları, deprem sonrası hasar tespit analizleri ve sel-taşkın modellemeleri gibi örnekler üzerinden bu teknolojilerin süreçleri etkin yönetme potansiyeli gösterilmiştir.

6.1 Türkiye’deki Güncel Kentsel Dönüşüm Çalışmaları

Türkiye’de son yıllarda yürütülen kentsel dönüşüm politikaları, özellikle afet riski altındaki alanların dönüştürülmesine odaklanmakta ve kapsamlı bir yeniden yapılanma sürecini beraberinde getirmektedir. 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkındaki Kanun çerçevesinde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı bünyesinde faaliyet gösteren Kentsel Dönüşüm Başkanlığı ile Toplu Konut İdaresi Başkanlığı (TOKİ) iş birliğiyle, riskli yapıların dönüşümü ve rezerv alanlarda yeni yerleşim birimlerinin inşası amacıyla çok sayıda proje hayata geçirilmiştir.

6306 sayılı Kanunda yer alan tanıma göre riskli yapı, riskli alan içinde veya dışında yer alıp ekonomik ömrünü tamamlamış olan ya da yıkılma veya ağır hasar görme riski taşıdığı, ilmi ve teknik verilere dayanılarak tespit edilen yapılardır [249]. Resmî Gazete kararlarıyla riskli alanlar, ülke genelinde farklı şehirlerde ilan edilmekte, bu alanlarda 6306 sayılı Kanun kapsamında dönüşüm uygulamaları yapılmaktadır. İstanbul gibi büyükşehirlerde ise “yerinde dönüşüm” modeli öncelikli tercih hâline gelmiştir [250]. Yerel yönetimlerle imzalanan protokoller doğrultusunda 81 ilde ve İstanbul’un tüm ilçelerinde dönüşüm süreçlerine belediyelerin aktif katılımı sağlanmıştır. Uzmanlara göre yalnızca İstanbul’da yaklaşık 1,5 milyon yapı risk altındadır ve bunların yaklaşık 600 bininin acilen dönüştürülmesi gerekmektedir [251]. Bununla birlikte vatandaş katılımını artırmak amacıyla “Yarısı Bizden” kampanyası gibi mali teşvik programları devreye alınmış ve öncelikli olarak İstanbul, Ankara, Bursa, Kocaeli, İzmir gibi illerde uygulamalar yoğunlaştırılmıştır. 2025 yılı itibarıyla dönüşüm başına 1.875.000 TL’ye kadar hibe, kredi ve taşınma yardımı sağlanmıştır [252].

6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremlerin ardından, “Yeniden Daha Güçlü Anadolu” hedefi doğrultusunda afet bölgesinde yeniden yapılanma süreci hızla başlatılmıştır [253]. Depremden etkilenen 11 ilde, şehir merkezlerinde toplu konut projeleri hayata geçirilmiş kırsal bölgelerde ise yerinde dönüşüm modeliyle desteklenen bireysel yapılar inşa edilmiştir. TOKİ tarafından afet sonrası yeniden yapılanma süreci çerçevesinde yüz binlerce konut ve iş yeri projelendirilmiş, 2024 yılı sonuna kadar yaklaşık 201.580’i hak sahiplerine teslim

edilmiştir [254]. Haziran 2025'te 250 bininci afet konutunun teslimi gerçekleştirilmiş olup yıl sonuna kadar toplamda yaklaşık 452.000 bağımsız bölümün teslim edilmesi hedeflenmektedir [251].

Kent planlamasında dijital verilerin etkili biçimde kullanılmasına yönelik ihtiyaç, teknolojik gelişmelerle birlikte hızla artmaktadır. Son yıllarda özellikle kentsel dönüşüm projeleri ile yeni kent planlama uygulamaları verimlilik, yaşam kalitesinin yükseltilmesi, ekolojik denge ve sürdürülebilirlik gibi hedefler doğrultusunda yeniden şekillendirilmektedir. Bakanlık, yeşil bina standartlarının uygulanmasını teşvik ederek enerji verimliliği, atık yönetimi ve çevresel etki gibi kriterleri dönüşüm projelerine entegre etmektedir [255].

2020–2024 yılları arasında ise bu kavramların BIM ile birlikte ele alındığı çalışmaların sayısında literatürde dikkate değer bir artış yaşanmıştır. Türkiye’de kentsel dönüşüm projelerinde henüz yaygın olarak BIM kullanılmamaktadır. Oysa ülke genelinde yürütülen kentsel dönüşüm ve yenileme çalışmalarının, BIM tabanlı yaklaşımlar ile planlanması ve uygulanması tasarım, inşaat, yıkım ve yeniden yapım gibi tüm aşamalarda süreçlerin daha etkin yönetilmesini sağlayabilir. BIM teknolojisi, projeye dâhil olan farklı paydaşlar arasında bilgi akışını ve koordinasyonu güçlendirerek zaman, maliyet ve kalite yönetiminde önemli avantajlar sunacaktır [256].

6.2 Kentsel Dönüşümde BIM’in Potansiyeli

Kentsel dönüşüm projeleri afet riski, sürdürülebilirlik hedefleri, sosyal mekân kalitesi ve kamu kaynaklarının verimli kullanımı gibi çok boyutlu planlanması gereken süreçlerdir [257]. Böyle projelerde disiplinler arası veri uyumu, süreçlerin denetlenebilirliği, maliyet ve zaman planlamasının kontrollü biçimde yönetilmesi oldukça önemlidir. Karar alma süreçlerinde farklı kurum ve teknik disiplinlerin ortak bir zeminde buluşmasını sağlayacak dijital bir altyapı gereksinimi doğmaktadır. BIM bu noktada kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır [258].

BIM, teknik iş akışlarını bütünleştirmenin ötesinde kentsel dönüşüm süreçlerini yönetilebilir ve izlenebilir hâle getirecek kapsamlı bir platform

sunmaktadır. Riskli yapı envanterinin çıkarılmasından proje dokümantasyonuna, enerji profili hesaplamalarından yaşam döngüsü analizlerine kadar birçok aşamada bütüncül bir çerçeve oluşturur [259]. Afet sonrası yeniden yapılanma gibi zaman baskısı ve kaynak sınırlılığı içeren durumlarda, BIM'in sunduğu senaryo temelli planlama ve süreç takibi işlevleri sahadaki koordinasyonu doğrudan etkiler [260].

BIM teknolojisinin stratejik plan ve projelere daha güçlü şekilde entegre edilmesi gerektiği açıktır. Modelleme altyapısının sadece proje bazlı değil kent ölçeğinde de kurumsallaştırılması, karar verici yapılar açısından süreç şeffaflığı, kaynak yönetimi ve kalite kontrolü konularında önemli kazanımlar oluşturacaktır. Büyük çaplı projelerde ortalama sürenin uzaması ve bütçelerin büyük oranda aşılması, bu kazanımlara olan ihtiyacı daha da artırmaktadır. BIM'in kentsel dönüşümdeki rolü teknik bir tercih değil, dönüşüm süreçlerinin daha dirençli, izlenebilir ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşması açısından zorunlu bir araç olarak değerlendirilmelidir [261].

BIM, projelerde farklı amaçlarla ve çeşitli aşamalarda etkili biçimde kullanılabilmektedir. Kimi uygulamalarda doğrudan çakışma tespitiyle maliyet tasarrufu sağlanırken, kimi projelerde planlama, değer analizi ve karar süreçlerine katkıları öne çıkmaktadır [262]. Üstelik bu fayda hesaplamalarına tasarım süreci, inşaat yönetimi ve idari süreçlerdeki dolaylı katkılar dâhil edilmediğinden, BIM'in gerçek yatırım geri dönüşü çoğu zaman görünenin çok üzerindedir [263].

Tablo 6.1'de BIM kullanımının çok yönlü faydalarının araştırılması sonucunda bulunan faydalar gruplandırılarak sunulmuştur.

Tablo 6.1 BIM Teknolojisinin Proje Yaşam Döngüsüne Faydaları [18]

Faydalar	Alt Faydalar	Açıklama
Planlama ve Maliyet Yönetimi	Zaman Planlamasında Doğruluk	Detaylı ve gerçekçi ön tasarım ile iş programı planlaması daha doğru yapılır, gecikmeler azalır. BIM ile iş programı süresinin %50'ye kadar azaldığını belirtmiştir. 3 farklı projede süre tahmini %1,94, %15,38 ve %80 oranında iyileşmiştir. Benzer projede %10 daha doğru süre tahmini yapılmıştır.
	Maliyet Tahmininde Doğruluk	Dinamik metraj ve model tabanlı koordinasyon, teklifle gerçek maliyet arasındaki farkı azaltarak bütçe sapmalarını en aza indirir. BIM kullanılan projelerde sapma %28 iken kullanılmayanda %66 ve genel doğruluk ise %48 olmuştur. BIM ile MEP için bütçe sapması sadece %1 olmuştur. Başka bir maliyet öngörüsünde sadece %3 sapma elde edilmiştir.
Tasarım ve Uygulama Süreci	Daha Verimli Tasarım ve Teslim Süreci	Model tabanlı ortak çalışma, merkezi veri paylaşımı, otomatik metraj/çizim üretimi ve parametre odaklı senkronizasyon, disiplinler arası iletişim kopukluklarını ortadan kaldırırken tekrarlanan görevleri makineleştirir ve tasarım ekibinin verimliliğini artırır. Tasarım maliyeti artsa da toplam proje maliyeti düşer. Tasarım maliyeti %52, süresi ise %50 azalmıştır. Çizim/hesap iş gücü %30–65, tasarım maliyeti ise %15–48 arasında azalmıştır. Verimlilik artışı %20–39 olmuştur.
	Daha Etkili Öğrenme Süreci ve İyileştirilmiş Adaptasyon	3B görselleştirme ve bütünleşik veri yapısıyla proje adaptasyonu kolaylaşır. İşgücü verimliliği %6 arttı. Genç çalışanların projeyi kavrayışı %50 arttı.
	Karmaşık Tasarım Yeteneği	Parametrik tasarımın sağladığı karmaşık geometriler, zaman boyutlu analizlerle inşaat süreciyle ilişkilendirilerek güvenlik açısından önceden test edilebilmekte ve daha güvenli tasarımlar ortaya çıkarılabilmektedir.
	Geliştirilmiş Tasarım Analizi	Parametrik ve nesne yönelimli tasarım sayesinde farklı disiplinlerin aynı model üzerinden yapısal analiz, yangın simülasyonu ve enerji tüketimi gibi analizler yapılabilir.

Faydalar	Alt Faydalar	Açıklama
Verimli İnşaat Süreci	Şantiyede İyileştirilmiş 3B Koordinasyon	Tasarım uyumsuzlukları, inşaat sürecinde maliyetli değişiklik emirlerine yol açar, BIM sayesinde bu uyumsuzluklar erkenden tespit edilerek değişiklik ihtiyacı azaltılır.408 projede, BIM kullanılan projelerde değişiklik maliyet oranı %18,4'ten %2,68'e düşerek %15,74 tasarruf sağlandı. Benzer yapılar arasında yapılan karşılaştırmalarda değişiklik maliyetleri sırasıyla %42 ve %70 oranında azaldı. Karşılaştırılan iki BIM projesinde değişiklik maliyetleri %9,3 ve %4 azaldı. Perakende projesinde çakışma testleriyle değişiklik emri sayısı %7, maliyetler %9 oranında azaltıldı.
	Program Optimizasyonu ve Daha Hızlı Tamamlama	Bütüncül dijital tasarım ortamı ve belgelerin otomatik güncellenmesi sayesinde farklı tasarım senaryoları hızlıca değerlendirilir, planlama daha isabetli yapılır ve proje süresi önemli ölçüde kısalmır. Benzer projelerde erken tamamlanma sağlandı. Afet merkezi projesinde proje süresi %26,7 azaldı. Hastane projesinde prefabrikasyon ile takvim %18 kısaldı.
	Azaltılmış İnşaat Maliyeti	Tasarım hatalarını ve şantiyedeki revizyonları azaltarak inşaat maliyetlerinde düşüş sağlar. BIM ile teklif maliyetlerinde %5 azalma (MEP işleri). Çakışma tespiti ile MEP maliyetlerinde %2,91 düşüş. BIM kullanılan konut projelerinde m ² başına maliyet %8,61 azaldı.SCL St. Joseph Hastanesi projesinde prefabrikasyon ile %66 tasarruf, %18 zaman kazanımı. 9 milyon dolarlık hastane projesinde 500 bin dolar (%5.56) MEP tasarrufu, toplamda %9.28 maliyet düşüşü olduğu hesaplanmıştır.
	Daha Az Yeniden İş	3B koordinasyon ve tasarım-şantiye uyumu sayesinde revizyon oranı ve yeniden iş yapma gereksinimi azalır. Revizyonlar proje süresinin %50'sinden, bütçenin %5–25'inden sorumluyken, %50'si tasarımla ilişkilidir. BIM koordinasyonu ile revizyon oranı %4,8'e kadar azaltıldı. BIM yatırımıyla projede %0.02–0.03 tasarruf edildi.MEP alt yüklenicilerinde revizyon %0,2 azaldı.
Verimli İnşaat Süreci	Prefabrikasyon Katılımının Artması	Model tabanlı hassas tasarım sayesinde üretim hataları ve uygulama süresi azalır, prefabrikasyon olanakları artar. Tasarım hataları azalır, üretim ve uygulama süresi kısalmır, üretici kısıtları önceden analiz edilir.

Faydalar	Alt Faydalar	Açıklama
	Atık Azaltımının İyileştirilmesi	3B koordinasyon ve nicel modelleme sayesinde malzeme planlaması ve atık kontrolü sağlanır, tasarım hataları ve fazla sipariş azaltılır. Revit eklentisiyle malzeme ayrıştırma yapılarak depolama maliyetleri %70 azaltıldı. İnşaat atığı malzeme alımının %1–10’u arasında. Konut projesinde atık %15,2, spor kompleksi projesinde %4,3 azaldı. Atık tasarrufu ile toplam maliyette de büyük tasarruflar elde edilir.
Sürdürülebilirlik	İtibar ve Prestij Kazanımı	5B BIM ile proje başarısı artar, hata oranının düşmesi ve kalite artışı şirket itibarını ve pazar fırsatlarını güçlendirir. Başarılı BIM projeleri yeni iş fırsatları yaratır.BIM, iş kalitesini artırarak sektör itibarını destekler.
	İyileştirilmiş İş Sağlığı ve Güvenliği Protokolleri	4B süreç simülasyonu, otomatik kod denetimi ve AR/VR görselleştirmeyle inşa sürecindeki tehlikeler proaktif biçimde tespit edilip önlenerek kazaların %90’a varan kısmı engellenebilir. Kural tabanlı model denetimiyle güvenlik açıkları otomatik olarak saptanıyor. Şantiye kazalarının %90’ı yeterli önlemle önlenabilir.
	Ekip Bileşiminde Esneklik ve Küreselleşmenin Artışı	Bulut tabanlı ortak çalışma, zengin model verisi ve kod denetimi sayesinde konum ya da saat dilimi engelleri aşılar, proje ekipleri dünya çapında uzmanlarla esnek biçimde genişletilebilir. Yerel işgücüne bağımlılık düşer, uzman maliyetleri optimize edilir.
	Yüksek Son Kullanıcı Memnuniyeti	Görselleştirme (VR), bütünleşik model verisi ve canlı sensör entegrasyonu, kullanıcıların tasarımı erken aşamada kavramasını, geribildirim vermesini ve yapı ömrü boyunca gereksinimlerinin karşılanmasını kolaylaştırır. Kullanıcı merkezli tasarım için güvenilir planlama ve iletişim iyileşir. Tasarım fazında kullanıcı geribildirimi hızlanır, uyum artar.VR araçları kullanıcı katılımını güçlendirir.Canlı veri ile bakım odaklı yönetim desteklenir.
	Enerji Verimli Tasarım	Geometrik ve özellik verisi ile bütünleşik enerji simülasyonu, tasarımın erken safhalarında parametrik senaryo analizi yaparak yaşam döngüsü boyunca %22’ye varan enerji tasarrufu ve CO ₂ azaltımı sağlar.Binalar küresel enerjinin %20–40’ını tüketiyor. Sektör CO ₂

Faydalar	Alt Faydalar	Açıklama
		emisyoununun %40'ından sorumlu. Model tabanlı tadilatla enerji kullanımı %22 azaldı. As-built BIM, kullanıcıların gerçek tüketimi izlemesine ve iyileştirmeye katılımını sağlar.
Geliştirilmiş Bilgi Yönetimi ve İş Birliği	Teknik Uyuşmazlıkların ve Değişiklik Taleplerinin Azalması	Model tabanlı bilgi bütünlüğü, 3B koordinasyon ve otomatik denetimler tasarım belirsizliklerini azaltarak RFI (Request for Information) hacmini ve buna bağlı işgücü/maliyet kayıplarını düşürür. RFI, Küçük projede %34, yaşam tesisi projede değişiklik emirleri %68, orta ticari projede %43 azaldı. Kanada'daki perakende/ ticari projede 3B çakışma analiziyle RFI sayısı %4.8 düştü. 1 milyon dolarlık iş hacmi başına RFI BIM ile %28.5 azalma oldu.
	Verimli Toplantılar	Bulut tabanlı model paylaşımı ve 3B/online görselleştirme, toplantı gündemini netleştirip eş-zamanlı dijital geribildirim olanağı sunarak fiziksel buluşma ihtiyacını ve yanlış anlama riskini azaltır. Model odaklı toplantılar koordinasyon ve iletişimi güçlendirdi. Tasarımın temelini açıklamaya harcanan süre kısaldı, toplantı verimliliği arttı.
	Basılı Evrakların Azaltılması ve Dokümanların Kolay Kontrolü	Model merkezli yaklaşım ve dinamik çizelgeler sayesinde baskı ihtiyacı azalır, bulut tabanlı yapı ile dokümana erişim, kontrol ve güncelleme sürdürülebilir ve eşzamanlı şekilde sağlanır. Profesyonellerin çoğu belge yönetiminde iyileşme olduğunu belirtmiştir.
	Daha Verimli Tesis Yönetimi	Model nesnelere entegre edilen bakım, tedarik ve maliyet verileri ile işletme süreci dijitalleştirilir, yaşam döngüsü maliyetlerinin %60–85'ini kapsayan bu fazda karar alma ve enerji yönetimi optimize edilir. Modeldeki malzeme bilgileri ve kullanım senaryoları üzerinden enerji tüketim analizleri yapılabilir, bu da uzun vadeli enerji tasarrufu sağlar.
	İyileştirilmiş Tasarım Koordinasyonu ve Algısı	Model tabanlı görselleştirme ve kullanıcı katılımı, teknik bilgi düzeyi düşük paydaşların tasarımı daha iyi kavramasını sağlar. Böylece işlevsellik artar, proje sonunda sürprizler azalır. Kullanıcılar tasarım sürecine daha erken ve etkin katılım sağlar. VR entegrasyonu ile tüm paydaşlarda tasarım algısı belirgin şekilde gelişir.

Günümüzde inşaat projelerinde başarı yalnızca maliyet, süre ve kalite yönetimiyle sınırlı değildir. Bilgi paylaşımı, iş birliği ve koordinasyon da en az bunlar kadar belirleyici unsurlar arasında yer almaktadır. BIM, tüm paydaşlar arasında ortak bir çalışma zemini sunarak, tasarım kararlarının paylaşılmasını, bilginin eksiksiz aktarılmasını ve sürecin daha uyumlu ilerlemesini sağlamaktadır. Geleneksel 3B çizimlerin ötesine geçerek malzeme bilgileri, fiyatlar, bakım ihtiyaçları ve montaj rehberlerini de içeren dijital veri tabanlarıyla entegre çalışan BIM, hataların önceden fark edilmesine, risklerin azaltılmasına ve uygulama kalitesinin yükselmesine doğrudan katkı sunmaktadır [18].

BIM'in faydaları yapım aşaması ile birlikte inşaat öncesi ve sonrasındaki aşamalarda da belirginleşmektedir. Yapım öncesinde fizibilite çalışmalarına entegre edilmesi, projelerin daha doğru tahminlerle planlanmasını kolaylaştırırken, paydaşların sürece erken katılımını mümkün kılarak karar alma mekanizmalarının güçlenmesini sağlar [262]. Maliyet ve zaman planlamasının daha güvenilir yapılması, olası belirsizliklerin en aza indirilmesine yardımcı olur. Tasarım aşamasında ise farklı disiplinlerin verilerinin ortak bir platformda buluşturulması sayesinde koordinasyon artar, hata payı azalır ve çakışmaların önceden belirlenmesiyle sahada karşılaşılabilecek sorunların önüne geçilir [263]. Bu aşamada BIM'in sunduğu üç boyutlu görselleştirmeler, karar vericiler için daha anlaşılır bir değerlendirme ortamı oluşturur [264].

İnşaat sürecinde BIM, simülasyon temelli planlamalar aracılığıyla iş programlarının ve lojistik süreçlerin daha verimli yönetilmesini mümkün kılar. Malzeme sevkiyatı, şantiye düzeni ve iş güvenliği önlemleri gibi konular, model üzerinden senaryolaştırılarak daha etkin biçimde uygulanabilir [265]. İnşaat sonrasında ise tesis yönetimi, bakım ve yenileme süreçleri BIM verileriyle desteklenir. Böylece yapının kullanım ömrü boyunca sürdürülebilirliğin korunması, enerji tüketiminin izlenmesi ve bakım maliyetlerinin azaltılması sağlanır [266]. Uzun vadede BIM, yalnızca proje süresince değil, yapının yaşam döngüsünün tamamında verimlilik ve şeffaflık sunan bir yönetim aracı olarak öne çıkar.

BIM'in tüm proje aşamalarında kullanıldığı örneklerde, tasarım hataları ve revizyon süreçlerinde azalma sağlandığı, zaman yönetimini ise iyileşme elde edildiği

raporlanmıştır [267]. Yalnızca tasarım aşamasında uygulandığında yazılım maliyetleri artsa da iş gücü maliyetlerinde düşüş görülmüştür. Diğer yandan, BIM kullanılmayan projelerde %30 program gecikmesi ve %62 maliyet sapması yaşandığı belirtilmiştir [268]. Bulgular, BIM'in tüm yaşam döngüsüne entegre edilmesinin zaman ve maliyet açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak BIM, kentsel dönüşüm projelerinde tüm yaşam döngüsünü kapsayan, disiplinler arası iş birliğini güçlendiren ve karar süreçlerini daha şeffaf kılan bir yönetim sistemi olarak değerlendirilmektedir. Kentsel dönüşüm uygulamalarında BIM'in rolü, teknik katkılarına ek olarak sürecin bütüncül biçimde ele alınmasını sağlayan stratejik bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

6.3 Kentsel Dönüşümde Çevresel Gereklilikler ve BIM Tabanlı Sürdürülebilirlik Yaklaşımları

Kentsel dönüşüm projeleri, fiziksel yenilemenin yanında çevresel etkilerin azaltılmasını ve doğal kaynakların verimli kullanımını gözeten bütüncül yaklaşımlarla ele alınmalıdır. Arazi kullanımı, altyapı yatırımları, tarihi dokunun korunması ve ulaşım sistemleri gibi unsurlar birlikte değerlendirilerek çevreyle uyumlu bir planlama anlayışı geliştirilmelidir [269].

Son yıllarda inşaat sektörü teknik açıdan önemli ilerlemeler kaydetmiş olsa da yüksek enerji tüketimi ve çevre kirliliği nedeniyle eleştirilerin odağında yer almaktadır. Sektörün küresel enerji kullanımının yaklaşık %40'ını, atık üretiminin %25'ini ve su tüketiminin yine %25'ini oluşturduğu bilinmektedir. Kentsel dönüşüm projelerinde BIM kullanımı, bu tür çevresel sorunlara karşı daha verimli çözümler geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Sürdürülebilir inşaat yaklaşımlarının BIM ile desteklenmesi, çevresel etkilerin azaltılması açısından güçlü bir çözüm olarak öne çıkmaktadır [270].

Enerji kullanımı, kaynak verimliliği ve emisyon kontrolü gibi başlıklarda BIM teknolojisi önemli analiz ve yönetim olanakları sunmaktadır. Enerji tüketimi, karbon salımı ve hava kalitesi gibi kriterlere dayalı performans değerlendirmeleri ile yeşil bina tasarımlarını desteklemektedir [271]. Ayrıca, inşaat süreçlerinde malzeme israfını

azaltırken su tüketimi analizleri, saha yerleşim planlarının optimizasyonu ve lojistik faaliyetlerin verimli biçimde yönetilmesi gibi uygulamalarla da karbon emisyonlarının düşürülmesine yardımcı olmaktadır [272]. Isıtma-soğutma düzeni ile ışıklandırma sistemlerine ilişkin analizler sayesinde, enerji tüketimi açısından verimli tasarım seçenekleri henüz projenin ilk aşamalarında belirlenebilmektedir [273]. Böylece sürdürülebilir ve enerji dostu mahallelerin oluşturulması desteklenmektedir. BIM tabanlı dijital platformlar, proje ekiplerine çok yönlü analiz imkânı sunarak çevresel, yapısal ve mali etkileri bütüncül biçimde değerlendirmelerine ve enerji tasarrufuna yönelik stratejileri uygulamaya geçirmelerine yardımcı olmaktadır [274].

Kentsel dönüşüm süreçlerinde karbon emisyonlarının azaltılması, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak adına öncelikli hedeflerden biridir. BIM tabanlı karbon hesaplama yöntemleri, mevcut yapıların yıkımı ve yeni yapıların inşası aşamalarında ortaya çıkan emisyonların doğru şekilde belirlenmesini sağlamaktadır. Bu amaçla geliştirilen karbon dengeleme modelleri, yıkım aşamasındaki salınımları malzeme hacimleriyle ilişkilendirirken, yeni yapılar için her bileşen özelinde hesaplama yapabilmektedir. Revit tabanlı BIM modelleri aracılığıyla yapı bileşenlerinin miktarları otomatik olarak tespit edilerek sonuçlar istatistiksel yöntemlerle raporlanmaktadır. Ayrıca peyzaj alanlarının karbon tutma kapasitesi ve geçirimsiz zeminlerin yarattığı ek emisyonlar da hesaplamalara dâhil edilerek kentsel dönüşüm projelerinde karbon ayak izi çok yönlü değerlendirilerek düşük emisyonlu tasarım ilkeleri uygulanabilmektedir [275].

Enerji tüketimini azaltan sürdürülebilir teknolojilerin benimsenmesi ve CO₂ emisyonlarını düşürmeye yönelik hedeflere ulaşılabilmesi için, proje süreçlerinin en başından itibaren sürdürülebilir tasarım yaklaşımının benimsenmesi büyük önem taşımaktadır. Üç boyutlu tarama teknolojilerinin BIM ile entegre edilmesi sayesinde eksik bilgiler tamamlanır, sahadan elde edilen verilerle oluşturulan güvenilir dijital modeller tasarım sürecine doğrudan entegre edilir. Böylece uygulama aşamasındaki hata payı azalırken, ölçüm ve modelleme işlemleri BIM destekli yöntemlerle dijital ortama aktarılır ve elde edilen veriler sayesinde daha isabetli sonuçlara ulaşılır [269].

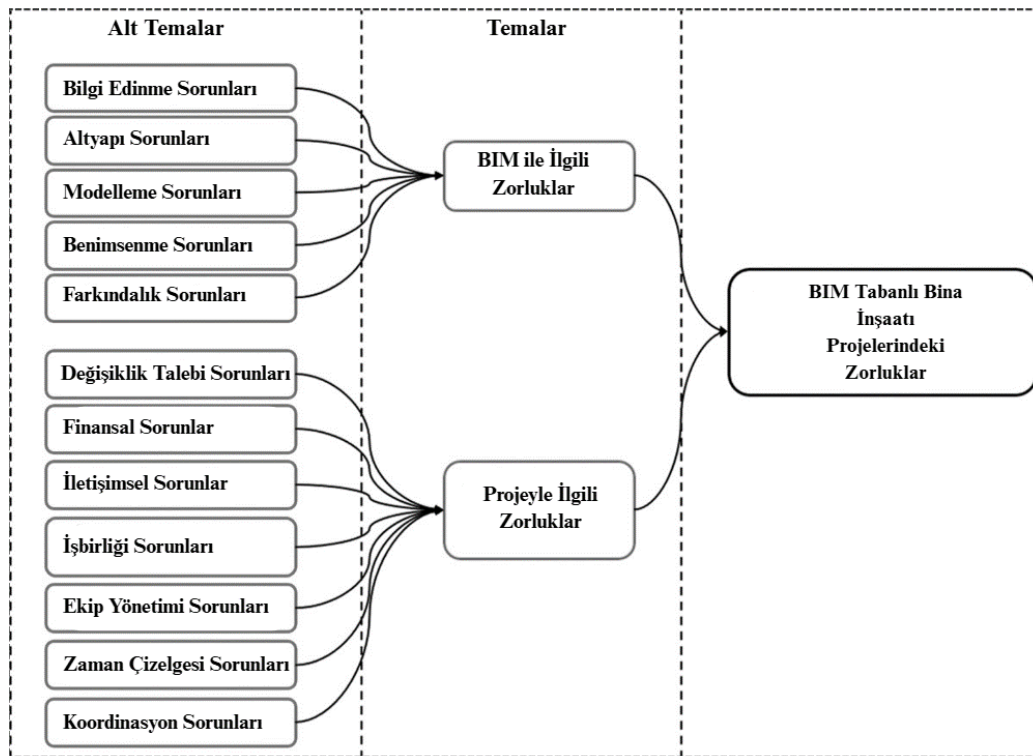
BIM, LEED değerlendirme kriterlerinin BIM ortamına entegre edilmesi ve gün ışığı analizleri gibi sürdürülebilirlik performanslarının nicel olarak ölçülmesini sağlar

[276]. Ayrıca çevre dostu malzeme seçimi [277], enerji verimliliği yüksek tasarımların geliştirilmesi [278] ve sürdürülebilir kentsel gelişim hedeflerinin desteklenmesi gibi alanlarda da BIM'in etkili bir araç olduğu gösterilmiştir [279].

6.4 Kentsel Dönüşüm Projelerinde Karşılaşılan Temel Sorunlar

Kentlerin dijital altyapılar açısından yetersiz olması, dönüşüm süreçlerinde önemli zorluklara yol açmaktadır. Birçok ülkede son 20 ila 60 yıl içinde inşa edilen veya yenilenen şehirlerin, bütüncül ve entegre bir bilgi sistemine sahip olmadığı görülmektedir. Özellikle eski binalarda yapısal güvenlik, enerji verimliliği ve malzeme kalitesi gibi konularda veri eksikliklerine sıkça rastlanmaktadır. Hatta bazı eski yerleşim bölgelerinde, arşivlerde dijital veriler bir yana, kâğıt üzerinde bile proje kayıtları bulunmamaktadır. Bahsedilen olumsuzluklar dijitalleşme çağında kentsel dönüşüm çalışmalarını daha karmaşık ve zor bir hale getirmektedir [269].

Şekil 6.1 BIM Bazlı Projelerdeki Zorlukların Sınıflandırılması [280]



BIM uygulamalarında karşılaşılan zorluklar genel olarak iki ana başlık altında toplanmaktadır: BIM'e özgü sorunlar (bilgi eksikliği, altyapı yetersizliği, modelleme hataları, düşük farkındalık) ve projeye özgü sorunlar (finansman, iletişim, ekip

yönetimi, koordinasyon, zaman planlaması) (Şekil 6.1). BIM tabanlı projelerin başarısı maliyet, süre ve kalite hedeflerinin eş zamanlı karşılanmasına bağlıdır. Ancak bu unsurlardan biri aksadığında modelin doğruluğu düşmekte, sahada tekrar işler yapılmakta ve BIM'in sağladığı avantajlar kaybolmaktadır [280].

Yüksek başlangıç maliyetleri, uzman personel ihtiyacı ve yatırımın geri dönüş süresine dair belirsizlikler özellikle küçük projelerde BIM'e olan ilgiyi azaltmaktadır. Ayrıca doğrulama yapılmadan oluşturulan modellerin veri kalitesi düşük olduğunda proje sürecinde çelişkiler ve verimsizlikler ortaya çıkabilmektedir. Yazılım uyumsuzlukları ve çıktıların farklı sistemlerle entegre edilememesi gibi teknik problemler de süreci aksatmaktadır [269]. Tüm bu nedenlerden dolayı "inşaat hazırlığı" kavramı öne çıkmaktadır. Veri doğruluğu, ekip donanımı ve sahaya uygunluk gibi unsurlar BIM uygulamalarının başarısında belirleyici olmaktadır. Araştırmalar, yeterli hazırlığın yapıldığı projelerde zaman ve maliyet açısından önemli kazanımlar sağlandığını göstermektedir [280].

Tablo 6.2 Kentsel Dönüşüm Projelerinde Karşılaşılan Temel Sorunlar [281]

Problem Başlığı	Detaylı Açıklama
Çoklu Hak Sahipliği ve Paydaş Yönetimi	Kentsel dönüşüm projeleri, mevcut yapıların yıkılıp yerlerine yenilerinin inşa edilmesini içerdiğinden, çoğu zaman birden fazla kat malikinin hak sahibi olduğu durumlarla karşılaşmaktadır. Boş arsada yapılan projelerde genellikle tek bir işveren yer alırken, kentsel dönüşümde 100'ü aşkın hak sahibiyi aynı aynı görüşmeler yapılması gerekebilir; bu durum proje planlama ve tasarım sürecinde ciddi zaman kayıplarına ve sık sık proje revizyonlarına neden olmaktadır.
Çevresel Etkiler ve Kirlilik Sorunları	Kentsel dönüşüm projeleri çoğunlukla şehir merkezlerinde yürütüldüğünden, yıkım ve inşaat faaliyetleri sırasında çevre üzerinde ciddi etkiler oluşmaktadır. Toz, gürültü, çevre kirliliği, trafik akışında bozulmalar ve çevredeki mevcut yapılara zarar verme riski gibi çeşitli olumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Proje süreçlerinde söz konusu etkilerin önceden belirlenmesi ve gerekli çevresel önlemlerin zamanında alınması büyük önem taşımaktadır.
Atık Malzeme Yönetimi Eksiklikleri	Yıkılacak yapılardan elde edilen atık malzemenin planlı ve verimli bir şekilde değerlendirilmesi günümüzde önemli bir gereklilik haline gelmiştir. Kentsel dönüşüm projelerinde bu konuda yeterli sistematik yaklaşım bulunmamaktadır. Mevcut yapıların dijital modellerinin oluşturulması sayesinde atık miktarları önceden hesaplanabilir ve geri dönüştürülebilir malzemeler tespit edilerek, kamu envanterine kazandırılabilir. Bu süreç maliyet tahminleri ve iş programları açısından da bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir. Maliyet tahmini zordur.
Kamu Kurumlarının İş Yüktü ve Yetersizlikler	Kentsel dönüşüm projelerinin artışıyla birlikte özellikle belediyeler ve ilgili kamu kurumlarının proje kontrol yükleri aşırı derecede artmıştır. Yönetmeliklerin getirdiği yeni nesil proje kontrolleri teknik kontrollerin ötesinde, hukuki ve idari kontrolleri de içermektedir. Kat maliklerinin durumları, tapu işlemleri, yeni yapıların yönetmeliklere uygunluğu gibi süreçler uzun zaman almakta, bu durum projelerin gecikmesine yol açmaktadır.
Mevcut Teknik Mevzuatın Yetersizliği	Kentsel dönüşüm projelerinin mevcut inşaat mevzuatına göre yürütülmesi, sürecin karmaşıklığını daha da artırmaktadır. Klasik mevzuat, dönüşüm projelerinin çok paydaşlı yapısına, yıkım aşamalarına, çevresel etkilerine ve atık yönetimine yeterince yanıt verememektedir. Mevzuat ile uygulama arasındaki bu uyumsuzluk projelerde standartların oluşmasını engellemekte ve süreçleri belirsiz hâle getirmektedir. Kentsel dönüşümün kendine özgü dinamiklerine uygun, aynı ve kapsamlı bir teknik düzenlemeye ihtiyaç duyulmaktadır.
Enerji Etkinlik Hedeflerinin Eksikliği	Kentsel dönüşüm projelerinin yalnızca yapı güvenliğine odaklanmaması, aynı zamanda enerji etkin, çevre dostu ve sürdürülebilir yapıları hedeflemesi gerekmektedir. Ancak mevcut uygulamalarda enerji verimliliği açısından yeterince planlı ve bütüncül bir yaklaşım benimsenmemektedir. BIM tabanlı projelendirme ile bu eksiklikler giderilebilir, enerji tüketimi erken aşamalarda simüle edilerek sürdürülebilir yapı hedeflerine ulaşılabilir. Enerji performansının önceden modellenmediği projelerde, uzun vadede hem ekonomik kayıplar hem de çevresel etkiler ciddi boyutlara ulaşabilmektedir.
BIM Uygulamalarının Yaygın Olmaması	Kentsel dönüşüm projelerinde dijital planlama araçları ve BIM tabanlı proje yönetim süreçleri yeterince yaygın şekilde kullanılmamaktadır. Oysa BIM sayesinde yapım sürecine geçmeden önce potansiyel sorunlar önceden tespit edilebilir, maliyet tahminleri daha doğru yapılabilir, atık malzeme yönetimi planlanabilir ve tüm paydaşlar süreçte entegre edilebilir. Sektörde ise hâlen farkındalık ve uygulama düzeyi oldukça sınırlıdır. Bu eksiklik, hem kaynak kullanımında verimsizliğe yol açmakta hem de projelerin sürdürülebilirlik hedeflerinden uzaklaşmasına neden olmaktadır.

Tablo 6.2’de, kentsel dönüşüm projelerinin planlama, uygulama ve sürdürülebilirlik aşamalarında karşılaşılan temel sorunlar özetlenmiştir. Mevcut uygulamalarda sıkça karşılaşılan yapısal, yönetsel, teknik ve çevresel problemler, her başlık altında kısa ama açıklayıcı şekilde ele alınmıştır. Çoklu hak sahipliği, kamu kurumlarının kapasite yetersizliği, mevzuat uyumsuzlukları ve dijitalleşme eksikliği gibi etkenler, projelerin zamanında tamamlanmasını ve sürdürülebilir hedeflere ulaşmasını güçleştirmektedir. Enerji verimliliği, atık yönetimi ve çevresel etki kontrolü gibi kritik konular ise hâlâ bütüncül bir yaklaşımdan yoksundur. Tablo, tespit edilen sorunların ışığında geliştirilecek çözüm önerilerine temel oluşturmak amacıyla hazırlanmıştır. Tablo 6.3’te kentsel dönüşüm süreçlerinde karşılaşılan sorunlara BIM kullanımı ile getirilen çözüm önerileri sunulmuştur.

Tablo 6.3 Kentsel Dönüşüm Projelerindeki Sorunlar ve BIM Çözümleri [281]

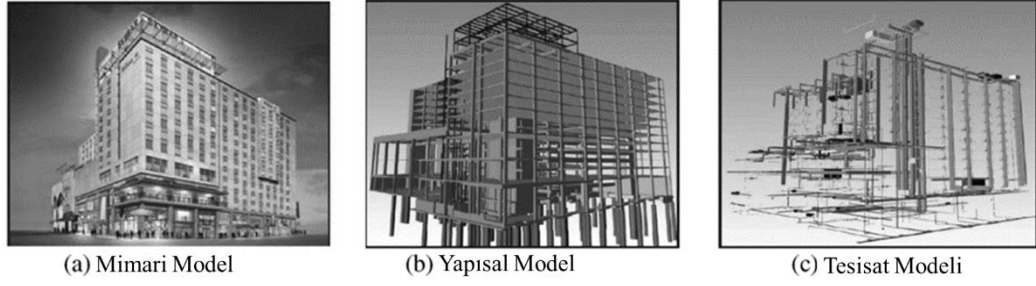
Konu	Sorunun Açıklaması	BIM ile Getirilen Çözüm
Riskli Yapı Tespiti ve Mevcut Yapı Analizi	Mevcut yapının dijital modeli oluşturulmadığı için riskli yapı tespiti uzun sürmekte (ortalama 3 ay). Yıkım metoduna dair görsel analiz yapılamamaktadır.	BIM ile mevcut yapı dijital ortamda modellenir; riskli yapı tespiti dakikalar içinde yapılabilir. Yıkım simülasyonu ile çevresel etkiler önceden analiz edilir.
İmar ve Görsel Kısıtlamalar	Antik doku, silüet gibi sınırlamalarla ilişkili yapıların görsel etkileri geleneksel çizimlerle önceden öngörülemezdir.	BIM modelleri üzerinden yapıların çevresel bağlamda sanal olarak görselleştirilmesi mümkündür. görsel etki analizleri hızlıca yapılabilir.
Yapısal ve Teknik Uygunluk Kontrolleri	Deprem yönetmeliği, tesisat ve elektrik projeleri gibi disiplinlerin uygunluk kontrolleri çok zaman almakta ve yalnızca hesaplamalarla doğrulanmaktadır.	BIM ile tüm yapısal ve teknik sistemler modele entegre edilir; yönetmeliklere uygunluk otomatik kontrol araçları ile kısa sürede test edilebilir.
İmar Durumu ve Raporlama Süreçleri	İmar kontrolleri uzun sürmekte ve subjektif raporlar üretilmektedir. İmar durumuna dair net analizler elde edilememektedir.	BIM modeline dayalı olarak geliştirilen script’ler aracılığıyla imar uyumluluğu hızlı ve objektif biçimde analiz edilir.
Malzeme ve Sertifikasyon Uygunluğu	Malzeme kontrolleri yalnızca sertifikalı ürünlerle sınırlı olup, detaylı uyumluluk değerlendirmesi yapılamamaktadır.	BIM modeliyle malzeme bilgileri yönetmeliğe uygunluk açısından otomatik olarak kontrol edilebilir.
Plansız Yıkım ve Düşük Geri Kazanım	Yıkım işlemleri teknik veriye dayanmadan yürütülür, malzeme ayrıştırması ve geri dönüşüm oranı düşüktür.	BIM ile yıkım simülasyonları yapılır, malzeme türleri önceden belirlenir ve ayrıştırma süreci planlanarak maksimum geri dönüşüm sağlanır.
Belirsiz Atık Miktarı ve Düşük Metraj Doğruluğu	Atık miktarları yalnızca tahmini olarak hesaplandığı ve yapısal elemanlar (örneğin donatı, kapı, pencere gibi) detaylı biçimde tespit edilemediği için geri kazanılabilir malzemelerde ciddi miktarda kayıp yaşanır.	BIM modeli üzerinden eleman bazında metraj alınabilir; hangi malzemeden ne kadar çıkacağı önceden hesaplanarak israf ve belirsizlik ortadan kaldırılır.
Lojistik ve Depolama Sorunları	Şantiye içi lojistik ve taşıma planlaması yapılmadığından, malzeme nakliyesi trafik yoğunluğuyla çakışarak gecikmelere neden olur; ayrıca atıkların şantiyede ayrıştırılması, uygun şekilde istiflenmesi ve satış süreçleri önceden organize edilmediği için geri kazanım verimliliği düşer.	BIM ile şantiye lojistiği detaylı şekilde analiz edilebilir. Atıkların taşınma ve istiflenme süreçleri zamanlama açısından optimize edilirken, geri kazanılacak malzemelere yönelik satış stratejileri de model üzerinden önceden planlanabilir.
Uzayan Süreçler ve Çevresel Etki Kontrolsüzlüğü	Geleneksel yöntemlerde ruhsat alma ve proje onay süreçleri zaman alıcıdır; ayrıca yıkım sürecinde ortaya çıkan büyük miktardaki atık nedeniyle çevresel etkilerin tam olarak analiz edilmesi ve gerekli önlemlerin zamanında planlanması güçleşmektedir.	BIM ile net ve koordineli projeler hazırlanarak ruhsat süreci kısılır; çevresel etki analizleri model üzerinden yapılır, gerekli önlemler zamanında alınır.

Konu	Sorunun Açıklaması	BIM ile Getirilen Çözüm
Mevzuata Uygunluk Denetimi ve Ruhsat Süreci	Yerel yönetimler proje mevzuata uygunluğunu manuel yöntemlerle denetlemekte ruhsat süreçleri ortalama 3–6 ay arasında sürmektedir. Uygulama farklılıkları ve subjektif raporlar süreçte belirsizlik yaratmaktadır.	BIM modeli üzerinden mevzuat uyumu otomatik kontrol kodları ile denetlenebilir. Ruhsat süreci birkaç gün içinde tamamlanabilir, denetimde eşitlik sağlanır.
Yıkım Metodu ve Riskli Yapı Analizi	Mevcut yapının modeli oluşturulmadığı için riskli yapı tespiti ve yıkım etkileri önceden simüle edilememektedir. Ortalama tespit süresi 3 ayı bulabilmektedir.	BIM modeli üzerinden riskli yapı analizi dakikalar içinde yapılabilir. Yıkım simülasyonları ile yapısal ve çevresel etkiler önceden test edilebilir.
Yapısal ve Disiplinler Arası Uygunluk Denetimi	Deprem yönetmeliği, tesisat, elektrik ve malzeme kontrolleri ayrı ayrı yapılmakta ve uzun zaman almaktadır. Detaylı analizler eksik kalmaktadır.	Yapı elemanları, tesisat ve elektrik sistemleri entegre BIM modeli üzerinde kontrol edilebilir. Uygunluk kontrolleri daha kısa sürede ve bütüncül olarak yapılır.
İmar Durumu ve Görsel Kısıtlamalar	Silüet, antik yapı etkisi, kat yüksekliği gibi imar kısıtlamaları model bazlı projeler olmadan önceden analiz edilememektedir.	3B BIM modelleri ile tüm kısıtlamalar görsel olarak analiz edilebilir. Sanal şehir ortamında projenin çevresel etkileri önceden görülür.
Enerji ve Sürdürülebilirlik Analizleri	Enerji verimliliği, çevresel etki ve sürdürülebilirlik analizleri manuel hesaplamalarla yapılmakta, bu da çok zaman almaktadır.	Enerji ve çevre analizleri doğrudan model üzerinde senaryolu olarak yapılabilir. Otomatik hesaplamalarla sürdürülebilirlik kriterleri erken aşamada test edilir.
Tasarım ve Uygulama Ayrışması	Yükleniciler tasarla yap modeliyle tüm süreci yürütmekte ancak birçok teknik konuda dışarıdan hizmet almak zorunda kalmaktadır. Bu durum kalite kontrolü ve zaman yönetimini zorlaştırmaktadır.	Tasarım ve uygulama aşamalarının bütüncül şekilde yönetilmesini sağlar hizmet entegrasyonunu kolaylaştırır, revizyonları hızlandırır.
Yetersiz Teklif Detayı ve Yoğun Revizyonlar	Alternatifli avan projeler hazırlanmakta ancak detay eksikliği nedeniyle çok sayıda toplantı ve revizyon süreci yaşanmaktadır.	Detaylı ve etkileşimli modeller üzerinden işveren talepleri önceden test edilebilir, gereksiz revizyonlar azaltılır.
Disiplinler Arası Uyum Sorunları	Statik, elektrik ve mekanik projelerin uyumu CAD ortamında yeterince denetim yapılamamaktadır. Düşey simetri sorunları teknik problemler doğurmaktadır.	Farklı disiplinlerin modelleri aynı ortamda çalıştırılabilir ve çakışmalar erken aşamada tespit edilir.
Teklif Yoğunluğu ve Dış Kaynak Maliyetleri	Çok sayıda bina yenilenmesi gerektiğinden yükleniciler her projeye teklif verememekte, fazla sayıda proje ofisiyle çalışmak zorunda kalmaktadır.	Teklif üretim sürecini hızlandırır, model tekrar kullanımına olanak sağlar, dış kaynak ihtiyacını azaltır.
Büyük Projelerde Zaman ve Sözleşme Yönetimi	30.000 m ² üzerindeki projelerde binlerce arsa sahibiyle görüşme ve güneş alma gibi bireysel talepler projeyi geciktirmektedir.	Görsel analizlerle bireysel talepler erken aşamada değerlendirilebilir, sözleşme öncesi netlik sağlanır.
İmar Revizyonları ve Proje Yenileme Sorunu	İmar durumunda yapılan değişiklikler projede büyük revizyonlara yol açmakta CAD ortamında bu değişiklikler çok zaman almaktadır.	Parametrik modelleme sayesinde imar revizyonları modele otomatik yansıtılabilir, yeniden üretim süresi kısalmaktadır.
Fizibilite ve Performans Analizi Eksikliği	CAD tabanlı yöntemlerde doğru cephe, ışık ve enerji analizleri yapılamamakta LEED gibi sertifika hedefleri planlamada dikkate alınmamaktadır.	Enerji, ışık ve performans analizleri entegre araçlarla modellenilebilir sürdürülebilirlik kriterleri proje başında izlenebilir.

6.5 BIM Teknolojisinin Katkılarına Örnek Çalışmalar

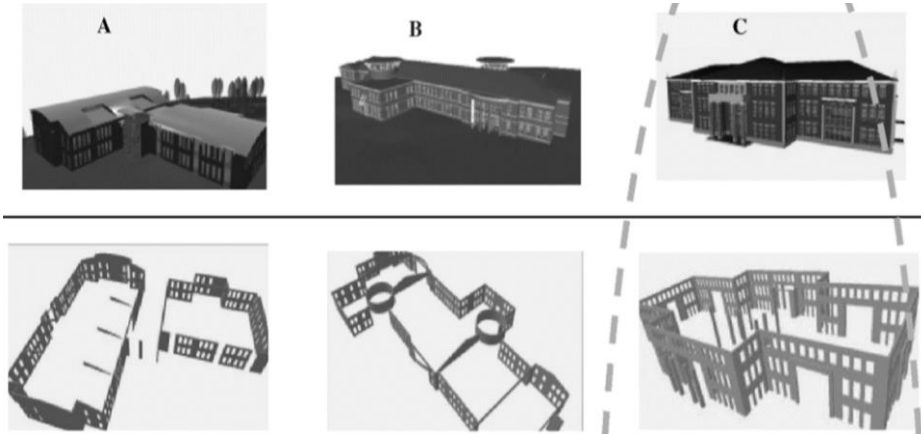
Aşağıda verilen örnekler doğrudan kentsel dönüşüm projelerinden alınmamıştır fakat, çakışma analiziyle maliyet düşürülmesi, erken aşamalarda alternatiflerin karşılaştırılması ya da 4B modelleme ile kaynak yönetimi gibi katkılar, kentsel dönüşüm projelerine de uyarlanabilecek niteliktedir.

Şekil 6.2 Projeye Ait Farklı Disiplin Modelleri [7]



Atlanta'daki Aquarium Hilton Garden Inn Projesi'nde, genel yüklenici BIM aracılığıyla MEP ve diğer disiplin modellerini birleştirerek (Şekil 6.2) inşaat öncesinde çakışma analizi gerçekleştirmiş ve 590 potansiyel çakışma sahaya çıkılmadan tespit edilmiş, sadece %0,2'lik bütçe payıyla (yaklaşık 90 bin dolar) 200 bin dolar doğrudan tasarruf sağlanmıştır. Üstelik potansiyel tasarruf 800 bin doları aşmış ve kişi başına düşen çalışma saatini oldukça azaltmıştır. Elde edilen başarılar mimar ve yüklenicinin sonraki projelerinde BIM kullanımını zorunlu hale getirmesine ve yatırımcının modeli işletme ile pazarlama süreçlerinde BIM kullanmasına zemin hazırlamıştır. Kentsel dönüşüm projelerinde de benzer şekilde, çok disiplinli süreçlerde altyapı ve üstyapı çakışmaları BIM aracılığıyla önceden tespit edilerek sahada karşılaşılabilecek sorunlar en aza indirilebilir [7].

Şekil 6.3 Projeye Ait Farklı Tasarım Alternatifleri [7]



Savannah Eyalet Üniversitesi Projesi'nde ise BIM, erken planlama aşamasında karar desteği sağlayacak biçimde kullanılmıştır. Genel yüklenici, mal sahibi ve mimar birlikte çalışarak üç farklı tasarım alternatifi (Şekil 6.3) oluşturmuş, her biri için BIM

tabanlı maliyet analizleri yapılmıştır. 3B görselleştirme oturumları sayesinde tüm paydaşlar sürece katılmış ve karar alma süreci sadece iki haftada tamamlanmıştır. Sonuç olarak yalnızca 5 bin dolarlık BIM yatırımıyla daha ön tasarım aşamasında 2 bin dolarlık tasarruf sağlanarak hızlı ve şeffaf karar süreçleriyle geleneksel yöntemlerin ötesine geçilmiştir. Kentsel dönüşüm projelerinde de vatandaş, yerel yönetim ve yatırımcı gibi çok paydaşlı aktörlerin sürece katılımını kolaylaştırarak şeffaf ve ortak karar alma süreçlerine zemin hazırlar [7].

Bir lüks otel projesi olan “Mansion on Peachtree”, tasarım eksikleri, koordinasyonsuz çalışma ve sık değişiklik talepleri nedeniyle ciddi riskler barındırıyordu. Hızlı bir takvimle yürütülen projede, ekip süreci disipline etmek için planlama ve dokümantasyon aşamasında BIM’i devreye aldı. Belgelerdeki eksikler tespit edildi, imalat çizimleri koordine edildi ve mal sahibine sunulan iki cephe seçeneğinden dayanıklı prekast beton tercih edildi. 4B modelleme ile zaman ve kaynak yönetimi iyileştirildi. Sadece 1.440 dolarlık BIM yatırımıyla yaklaşık 15 bin dolar tasarruf sağlandı ve proje zamanında, bütçe aşılmadan tamamlandı. Kentsel dönüşüm projelerinde de benzer şekilde, hızlı ve bütçesi sınırlı süreçlerde BIM’in 4B modelleme desteğiyle zaman ve kaynak yönetimi daha etkin biçimde gerçekleştirilebilir [7].

6.6 BIM ve CBS Entegrasyonunun Afet Süreçlerindeki Katkıları

21. yüzyılda yaşanan afetler kentler üzerinde ciddi sosyal, ekonomik ve fiziksel etkiler yaratmaktadır. Geçmişe ait veriler günümüzdeki karmaşık risk ortamında güvenilir öngörüler sağlamadığından, afetlerin boyut ve etkileri giderek daha öngörülemez bir hâl almaktadır. Artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılayacak altyapı ve hizmetlerin inşasında, gelecekteki nesillerin refahını gözeten, afetlere dayanıklı ve sürdürülebilir stratejilerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. AFAD’ın 2024 yılı raporuna göre Türkiye’de 8.058 doğa kaynaklı afet olayı yaşanmış, 2023 raporunda ise bu sayı 5.233 olarak belirtilmiştir. Raporlarda afetlerin büyük çoğunluğunu deprem, orman yangını, su baskını, heyelan ve çığ olayları oluşturmaktadır. 6 Şubat 2023 Pazarcık – Elbistan (Kahramanmaraş)’da 7,7 büyüklüğündeki deprem sonucu resmi rakamlara göre 50.783 kişi hayatını kaybettiği, 37.984 binanın ise yıkıldığı raporlanmıştır. Afetlerin neden olduğu can kayıpları ve maddi zararlar dikkate alındığında, kentsel alanlarda afet yönetiminin etkinliğinin artırılması kritik bir

gereklilik haline gelmiştir. Afetlere karşı dirençli toplumların inşası için kurumların sorumluluk üstlenmesi, aynı zamanda teknolojik çözümleri karar alma ve uygulama süreçlerinde aktif biçimde kullanması gerekmektedir.

Afet yönetimi bağlamında BIM–CBS entegrasyonu, risklerin önceden tespit edilmesi, afet öncesi hazırlıkların planlanması, afet anında hızlı müdahale ve afet sonrası iyileştirme süreçlerinde kritik katkılar sunmaktadır. Yapıların fiziksel ve işlevsel verilerini mekânsal bilgilerle birleştirerek karmaşık kentsel sorunlara daha bütüncül ve etkili çözümler geliştirilmesini sağlamaktadır. BIM sistemleri, binaların yapısal detayları, iç mekân koşulları, işlevsel bileşenleri ve 3B görselleştirmelerine dair kapsamlı dijital bilgiler sağarken CBS teknolojileri ise mekânsal analiz, görselleştirme, sorgulama ve karar destek süreçlerinde güçlü araçlar sunmaktadır. Bu iki sistemin entegrasyonu, bina içi analizlerden şehir geneli afet senaryoları düzeyine kadar çok katmanlı analizlerin gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır [257].

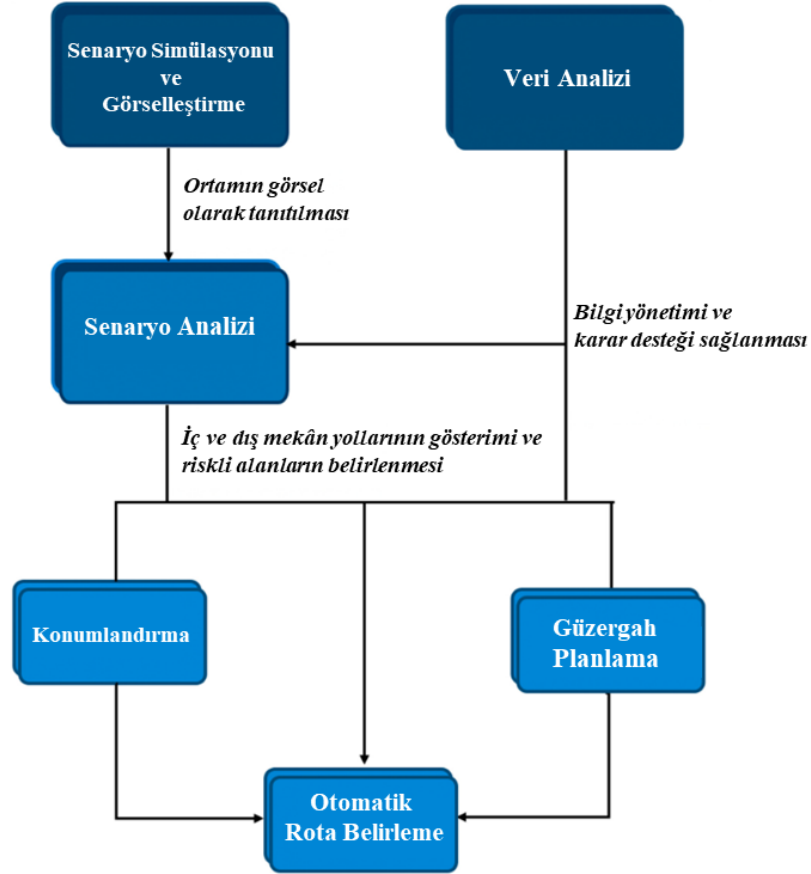
6.6.1 Afet Yönetiminde BIM–CBS Entegrasyonunun Temel Adımları

Literatürdeki çalışmaların büyük bölümü, iç mekân konumlandırma ve otomatik yön bulma analizlerini özellikle yangın ve deprem gibi acil müdahale gerektiren senaryolar üzerinden işlemiştir. Sel ve heyelan gibi afet türleri ise daha çok yer seçimi ve planlama süreçlerinde ele alınmıştır. BIM’in ayrıntılı modelleme ve sensör entegrasyonu, CBS’nin geniş ölçekli analiz ve görselleştirme yetenekleriyle birleştiğinde riskin tanımlanması ve müdahalenin planlanması süreçleri daha verimli ilerler. Çalışmalar, bu tür senaryo analizlerinin erken uyarıyı güçlendirdiğini ve gerçek zamanlı karar alma süreçlerini hızlandırdığını belirtmektedir. Yapı ölçeğinde üretilen detaylı bilgilerin bölgesel analizlerle entegre edilmesi, afet risklerine karşı daha duyarlı, hızlı ve bütüncül çözümler oluşturulmasını desteklemektedir [282].

Şekil 6.4’te, BIM-CBS entegrasyonunun afet yönetiminde sunduğu temel adımlar gösterilmektedir. İlk aşamada, Senaryo Simülasyonu ve Görselleştirme modülü, farklı afet türleri için iç ve dış mekânların yüksek doğrulukta ve çok boyutlu temsillerini oluşturur. Bu temsiller her afet kategorisi için senaryoların gerçeğe en yakın şekilde canlandırılmasını sağlayarak afet yönetim kalitesi ve verimliliğini artırır.

Elde edilen simülasyon çıktıları, Senaryo Analizi modülüne aktarılır. Bu aşamada bina içi ve çevresel risk alanları belirlenir, iç ve dış mekân rota senaryoları analiz edilir.

Şekil 6.4 BIM ve CBS'nin Afet Yönetimindeki Yetkinlikleri [282]



Örneğin yangın senaryolarında, yanıcı malzemelerin konumu, yapı elemanlarının ısı özellikleri, kaçış yolları ve mevcut ekipmanlar gibi değişkenleri dikkate alarak yangının yayılımı, toksik gaz dağılımı ve güvenli sığınma alanlarının tespitini sağlar. Analiz sürecindeki çıktılar Konumlandırma ve Güzergâh Planlama modülüne veri sağlar. Konumlandırma modülü, kullanıcıların mekân içindeki konumlarını tespit ederken, Güzergâh Planlama modülü ise riskli bölgelerden kaçarak güvenli güzergâhların oluşturulmasına odaklanır. Her iki bileşenden elde edilen bilgiler, Otomatik Rota Bulma modülünde birleştirilerek afet anında yönlendirme desteği sağlar. Tüm süreç boyunca Veri Analizi modülü merkezi bir rol üstlenir. Bilgi yönetimi ve karar destek işlevleri kapsamında senaryo analizine ve rota planlamaya katkıda bulunur. Jeolojik riskler, su baskını seviyeleri, sismik veriler ve

atmosferik değişkenler gibi çok çeşitli afet verileri entegre edilerek, afetin farklı aşamalarında (önleme, müdahale ve iyileştirme) etkili çözümler üretilmesine olanak tanır [282].

Konum belirleme, senaryo modelleme ve rota planlama birlikte çalıştığında, otomatik yol bulma ile mağdurlar ve kurtarma ekipleri için engellerden arındırılmış güvenli kaçış güzergâhları üretir. Güzergâh üzerindeki riskler ve mevcut kaçış destekleri tanımlanarak tahliye daha güvenli hâle gelir. Literatür kırılğan yapılar (cam, kapı vb.) gibi tehlikelerin BIM–CBS tabanlı afet yönetimiyle önceden saptanabildiğini ve yönlendirme ile tahliye stratejilerinin bu sayede daha etkili planlandığını gösterir [283].

Tashakkori ve ekibine göre, afet müdahalesinin başarısı büyük ölçüde doğru ve zamanında bilgiye ulaşılmasına bağlıdır. İlk müdahale ekiplerinin etkin çalışabilmesi ve etkilenen kişilerin korunabilmesi için iç ve dış mekâna dair çeşitli verilere ihtiyaç vardır. İç mekân verileri; yapı içindeki insan hareketleri, anlık yoğunluk bilgisi ve erişilebilirlik gibi unsurları kapsar. Dış mekân verileri ise yol durumu, trafik yoğunluğu, kurtarma birimlerinin konumu ve çevredeki tesisler gibi bilgiler önem kazanır [284].

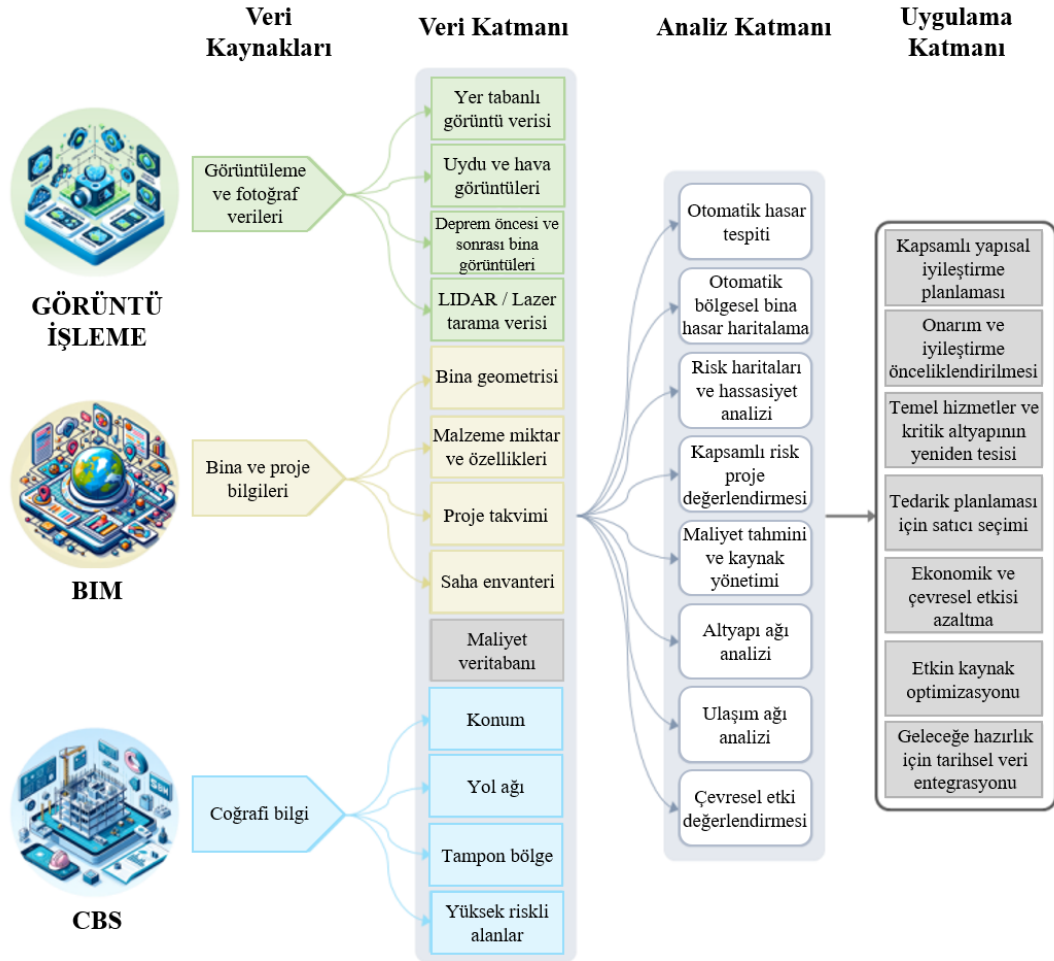
Tüm bu kritik verilerin toplanması, organize edilmesi ve dağıtımı, BIM-CBS destekli senaryo modelleme ve analiz uygulamaları aracılığıyla mümkündür. Afet senaryolarına dayalı modeller ile kurtarma ekipleri RFID, GPS, WLAN ve benzeri sensör teknolojilerini kullanarak tehlike altındaki bireylerin yerini tespit edebilir [96]. Konum tespiti modelin sahip olduğu detay seviyesi, kullanılan sensörlerin özellikleri ve yerleştirilme stratejilerine bağlı olarak noktasal koordinat düzeyinde ya da kişinin bulunduğu kat veya odanın numarası gibi genel bilgilerle sağlanabilir [282].

6.6.2 Afet Sonrası Hasar Tespiti ve İyileştirme Süreçleri için Uygulama Çerçevesi

Adrianto ve ekibi, afet sonrası müdahale süreçlerinde daha hızlı, doğru ve verimli bir planlama için bina kurtarma yönetimini optimize etmeye yönelik özgün bir yaklaşım sunmuştur. Depremden sonra binaların hasar görüp görmediğini belirleme, onarım sürecini planlama ve uygulama aşamaları oldukça karmaşık ve zaman alıcıdır.

Geliştirilen sistemde, öncelikle derin öğrenme tabanlı görüntü işleme yöntemleri kullanılarak binada hasar gören yerler tespit edilmiştir. Tespit edilen hasarlar, BIM modeli ile ilişkilendirilerek görselleştirilmiş ve CBS ile şehir ölçeğinde analiz edilmiştir [285]. Şekil 6.5'te gösterilen her bir katman farklı görevler üstlenerek sürecin bütüncül biçimde yönetilmesini destekler.

Şekil 6.5 Deprem Sonrası Bina İyileştirme Çalışmaları Uygulama Çerçevesi [285]



Veri Kaynakları Katmanı, sürecin ilk bileşenini oluşturarak farklı teknolojik altyapılardan gelen verilerin giriş noktasıdır. Elde edilen hava ve yer görüntüleri, video kayıtları ve fotogrametrik veriler gerçek durumu yansıtır. BIM tabanlı yapı ve proje bilgileri, bina geometrisi, malzeme miktarları ve maliyet bilgileri gibi yapının iç yapısına dair detayları sunar. CBS kaynaklı coğrafi veriler ise konum, yol ağı, tehlike bölgeleri ve tampon alan gibi mekânsal bilgileri sağlar. Bu çok kaynaklı veri akışı, sonraki katmanlara aktarılmadan önce Veri Katmanı altında organize edilir [285].

Veri Katmanı, farklı disiplinlerden gelen ham verilerin işlenerek analizlere uygun formata dönüştürüldüğü aşamadır. Görüntü verileri (ör. uydu, İHA, LIDAR), yapı geometrisi ve projeye ilişkin bilgiler, saha envanteri, maliyet veri tabanları, konum, yol ağları ve yüksek riskli alanlara dair mekânsal bilgiler bu katmanda entegre edilir. Böylece fiziksel, yapısal ve mekânsal veriler analitik işlemler için ortak bir tabanda buluşturulur [285].

Analiz Katmanı, entegre edilen verilerin anlamlı çıktılara dönüştürüldüğü aşamadır. Bu katmanda görüntü işleme yöntemleri devreye girer. Görüntü segmentasyonu ve derin öğrenme algoritmaları (ör. *Detectron2*) sayesinde binalardaki hasarlar otomatik olarak tespit edilerek çatlaklar, beton dökülmeleri ve açığa çıkmış donatılar gibi yapısal bozulmalar detaylı biçimde sınıflandırılabilir. Elde edilen hasar verileri BIM modeliyle eşleştirilerek hangi yapı elemanlarının etkilendiği belirlenir. Devamında CBS altyapısı üzerinden konuma bağlı mekânsal analizler gerçekleştirilerek yıkımın bölgesel dağılımı, kritik ulaşım ağları ve müdahale güzergâhları tespit edilebilir hale gelir [285].

Uygulama Katmanı, analiz çıktılarının sahaya dönük karar destek araçlarına dönüştürüldüğü son aşamadır. Burada hangi binaların kurtarılmasının öncelikli olduğu, kaynakların nasıl dağıtılacağı, ulaşım yollarının nasıl planlanacağı gibi kritik kararlar verilir. Aynı zamanda çevreye olan olumsuz etkilerin azaltılması, tedarik planlaması ve ekonomik önceliklerin belirlenmesi gibi sürdürülebilir iyileştirme hedefleri oluşturulur. CBS ile ulaşım rotaları optimize edilirken BIM aracılığıyla hangi yapı elemanlarının onarılması gerektiği belirlenir. Hasarın kapsamı net biçimde ortaya konur [285].

Şekil 6.8’de sunulan bütünleşik yapı, her ne kadar deprem odaklı olsa da kullanılan BIM–CBS–Görüntü İşleme yaklaşımı hasar türleri ve veri kaynakları değiştirilerek farklı afet türlerine de uyarlanabilir. Örneğin sel ve su baskınlarında binaların alt katlarında oluşan hasarlar, heyelanlarda yapı temellerinde kayma ve oturmalar, çığ olaylarında çatıların aşırı yüklenme nedeniyle zarar görmesi, yangınlarda ise cephe kaplamaları ve taşıyıcı elemanlarda oluşan deformasyonlar görüntü işleme teknikleriyle BIM modellerine aktarılabilir. CBS destekli analizler ise

afetin türünden bağımsız olarak lojistik ve yeniden inşa planlamasına mekânsal destek sağlar [285].

6.7 BIM–CBS Teknikleriyle Afet İzlenmesi, Önlenmesi ve Analizi

Akıllı şehir uygulamaları kapsamında BIM ve CBS'nin şehir düzeyinde bütünleşik kullanımı, afet yönetimi için hassas planlamaların yapılmasında etkilidir. Şehir genelindeki tüm kritik altyapı ve hizmet noktaları (hastaneler, itfaiyeler, polis merkezleri vb.) eş zamanlı olarak izlenebilir ve müdahale koordinasyonu sağlanabilir hale gelir [286].

6.7.1 Bina İçi Konum Tespiti ve Tahliye

BIM ve CBS'nin birlikte kullanımı, tahliye ve kurtarma süreçlerinin daha başarılı yürütülmesini sağlar. Üç boyutlu bina modelleri, acil durum senaryolarında binanın iç yapısına dair kritik bilgiler sunarak müdahale ekiplerinin doğru kararlar almasına yardımcı olur. Personel konumlandırma, rota oluşturma ve kurtarma planlarının hazırlanması gibi kritik adımlar, dijital altyapı sayesinde daha verimli şekilde yürütülebilir [275].

Sensör destekli iç mekân izleme, mahsur kalanların hızla tespitini sağlar [287]. Yeni algoritmalar ve kablosuz teknolojiler oda düzeyinde, gerçek zamanlı konum bilgisi üretir, çok katlı yapılarda barometrik basınç²⁶ ve sinyal verileriyle kat bilgisi belirlenir. Akıllı telefon ve Bluetooth'un BIM–CBS yazılımlarıyla entegrasyonu, bina içi konumun haritalanmasını sağlar ve doğruluk arttıkça müdahale süresi kısalmır [288].

6.7.2 Tahliye Planlama ve Rota Optimizasyonu

Afet anlarında etkin müdahale ve güvenli tahliye süreçlerinin yürütülmesinde rota planlama ve otomatik yol bulma işlevleri büyük önem taşımaktadır [276]. BIM ve CBS teknolojilerinin birlikte kullanılması, yapının iç dinamiklerini ve dış çevresel koşulları dikkate alarak en iyi kaçış senaryolarının oluşturulmasına imkân tanır. BIM'in 3B modelleme ve bilgi yönetimi özellikleri sayesinde yapıların iç düzeni ve

²⁶ **Barometrik Basınç**, Çok katlı yapılarda, akıllı telefon barometresinden okunan basınç farkı kat yüksekliğine çevrilir. BIM'deki kat kotlarıyla eşleştirilerek kişinin bulunduğu kat belirlenir.

riskli alanları belirlenebilirken, CBS geniş kentsel alanlar için yönlendirme alternatifleri sunabilir [278]. ArcGIS Data Interoperability uzantısı (Safe Software FME tabanlı), IFC ve Revit gibi BIM formatlarının ArcGIS ortamına aktarılması ve CBS formatlarıyla beraber çalışabilir hâle getirilmesini sağlayarak entegrasyondaki veri kaybını en aza indirir. Uzantı, ArcScene ve benzeri 3B görselleştirme araçlarıyla birlikte kullanıldığında, bina bileşenlerinin semantik düzeyde vurgulanmasına ve detaylı analizlerin gerçekleştirilmesinin önünü açar [284].

6.7.3 BIM ve CBS Teknikleriyle Sel ve Taşkın Tespiti

Taşkın hasarını azaltmak amacıyla afet yönetiminde erken risk tespiti ve uyarı sistemlerinin kurulması büyük önem taşımaktadır. BIM-CBS entegrasyonu taşkın tehlikesinin karmaşık yapısının analiz edilmesinde önemli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır [289]. Metro ve yer altı meydanları gibi yapılar, kentlerde taşkınlara en çok maruz kalan alanlardandır. Selin erken tespiti ve uyarısı kapsamında, yer altı suyu girişinin değerlendirilmesi de önemli bir analiz yaklaşımıdır. Hassani ve ekibi, hidrojeolojik yapı, jeoteknik koşullar ve tünel geometrisine dayalı olarak sabit durum yer altı suyu girişini SGR²⁷ (*Sample Generation by Replacement*) deneysel yöntemiyle hesaplamış ve bu verileri Sonlu Elemanlar Analizi (*Finite Element Analysis*)²⁸ ile destekleyerek zamanında müdahale olanağı sağlayacak risk değerlendirmeleri gerçekleştirmiştir [290].

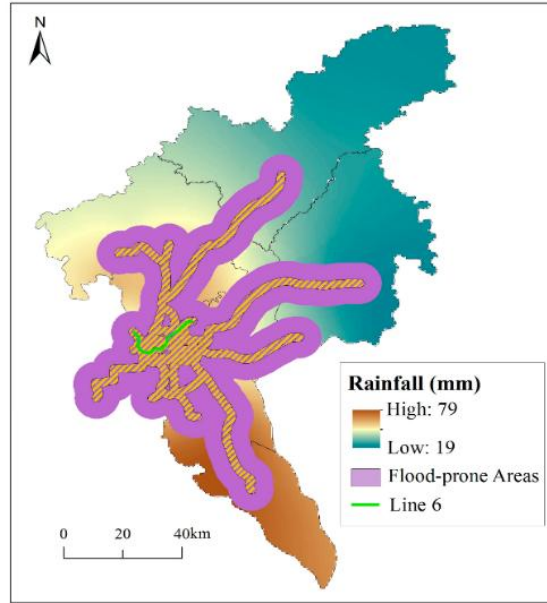
Kentsel taşkın yoğunluğu yağış miktarı, metro sisteminin yapısı, yer altı borularının dağılımı, drenaj altyapısının mekânsal özellikleri ve yol malzemesi gibi faktörlere bağlıdır. Lyu ve ekibi tarafından yapılan çalışmada, CBS kullanılarak eğim, yükseklik ve nehir ağı gibi coğrafi verilerle metro kaynaklı taşkın tehlikesi analiz edilmiştir. ArcMap'teki çoklu tampon analizleriyle, metro çevresindeki taşkın riski etkili biçimde modellenmiştir. Oluşturulan bu modeller düşük kotlu bölgelerin su altında kalma riskini ve metro altyapısının drenaj kapasitesine etkisini ortaya koymaktadır. Şekil 6.6'da görüldüğü üzere, Çin'deki Changpan Metro Hattı 6 (yeşil

²⁷ **SGR**, Parametreleri farklı olasılık aralıklarıyla yeniden üreterek belirsizlik altındaki değerleri tahmin etmeye yarayan yöntemdir.

²⁸ **Sonlu Elemanlar Analizi**, Karmaşık mühendislik problemlerini küçük parçalara ayırıp sayısal olarak çözen yöntemdir.

renk) güzergâhı ile sağanak yağış sırasında sel riski altındaki alanlar (mor renk) birlikte gösterilerek afet durumunun mekânsal olarak analiz edilebildiği bir örnek sunulmuştur [289].

Şekil 6.6 Yoğun Yağış Durumunda Sel Riski Altındaki Alanları ve Afet Durumunu Gösteren Harita [289]



Aynı çalışmada BIM'in Sünger Şehir²⁹ tasarımında önemli olduğu vurgulanmıştır. Çok yağış alan şehirlerde gelişmiş su depolama ve yüksek yoğunluklu drenaj sistemleri sayesinde ani yağışların etkisi azaltılabilmektedir. BIM–CBS entegrasyonu, bu altyapı sistemlerinin konum, kapasite ve tasarım bilgilerini yöneterek taşkın önleyici planların hazırlanmasını sağlar. Boru hattı gibi sistemlerinin planlanmasıyla yeraltı inşaatlarının drenaj sistemine vereceği olumsuz etkiler en aza indirilebilir. İnşaat halindeki yer altı alanlarında makinelerin GPS ile belirlenen üç boyutlu konumları, BIM ve CBS sistemlerine aktarılarak takip edilebilir. Böylece olası su baskınlarında personel ve ekipman için riskler önceden değerlendirilebilir [289].

²⁹ **Sünger Şehir (Sponge City)**, Yoğun yağış alan kentlerde sel riskini azaltmak amacıyla geliştirilen kentsel tasarım yaklaşımıdır.

6.7.4 BIM ve CBS Teknikleriyle Afet Sonrası Hasar ve Maliyet Değerlendirmesi

Afet sonrası iyileştirme sürecinde, bina ve yapıların hasar tespiti hayati bir adımdır. Xu ve ekibi, BIM ve FEMA P-58 kılavuzuna³⁰ dayalı bir çerçeve sunarak deprem sonrası bina durumu değerlendirmesini model haritalama ve bilgi aktarımıyla BIM'e entegre etmiş, böylece yeniden inşa maliyetlerinin tahmini için sağlam bir veri zemini oluşturmuşlardır [291]. Rad ve ekibi [292] bu çerçeveyi katlardaki kayma ve ivme gibi parametrelerle geliştirerek, FEMA P-58'e dayalı maliyet değerlendirmesi yapmıştır. Eudave ve Ferreira ise tarihi yapıların kırılma analizinde BIM ile HBIM modellerini bir araya getirmiş, uzaktan algılama ile elde edilen felaket sonrası görüntüleri CityGML formatında CBS'ye aktararak analiz sürecini desteklemiştir [293].

Zou ve ekibi [294], deprem sonrası köprü hasar tespiti için BIM ve drone destekli bir sistem önererek dijital çok boyutlu köprü modelleri oluşturmuşlardır. Onay süreçlerindeki gecikmeleri aşmak adına Messaoudi ve Nawari, BIM tabanlı Sanal İzin Çerçevesi (*Virtual Permit Framework*) ile onarım planlarını otomatik eşleştirme ve mevzuat uyumluluğu kontrolü sağlamıştır [295]. Büyük çaplı afetlerde tüm şehirleri kapsayan yeniden inşa süreçlerinde ise Assem ve ekibinin, mekânsal verilerle BIM modellerini bir araya getirerek bakım önceliklendirmesi ve 3B görselleştirme sunmuştur [296].

6.7.4.1 Sel Hasarı Değerlendirmesi Örneği

Amirebrahimi ve ekibi, BIM ve CBS entegrasyonu ile bina bileşenlerinin sele karşı direncini yüksek detayda değerlendirmek üzere kapsamlı bir bilgi sistemi geliştirmiştir. Melbourne'daki Maribyrnong bölgesinde yer alan tipik bir konut üzerinde sel senaryosu uygulanmıştır (Şekil 6.7). Analizde yükseklik modeli, detaylı IFC verisi, bileşen maliyetleri ve sel parametreleri (derinlik, hız, süre vb.) kullanılmıştır. Veriler, GML tabanlı bir modelde bütünleştirilmiş ve BIM bilgileri yarı otomatik yöntemle, taşkın verileri ise ayrı bir XML kaynağından alınarak entegre

³⁰ **FEMA P-58 Kılavuzu**, deprem sonrası bina performansını, olası hasarları ve ekonomik kayıpları tahmin etmeye yönelik metodolojik bir çerçeve sunmaktadır. ABD Federal Acil Durum Yönetim Ajansı tarafından yayımlanmaktadır.

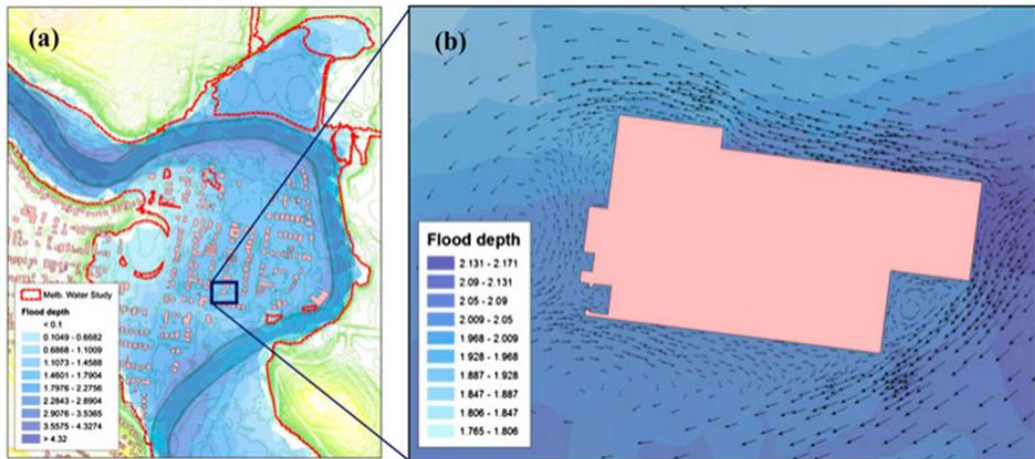
edilmiştir. Böylece tüm unsurlar tek bir GML veri yapısında toplanarak hasar analizine hazır hale getirilmiştir [297].

Şekil 6.7 Taşkın Analizi Yapılan Alan ve Yükseklik Değerleri Haritası [297]

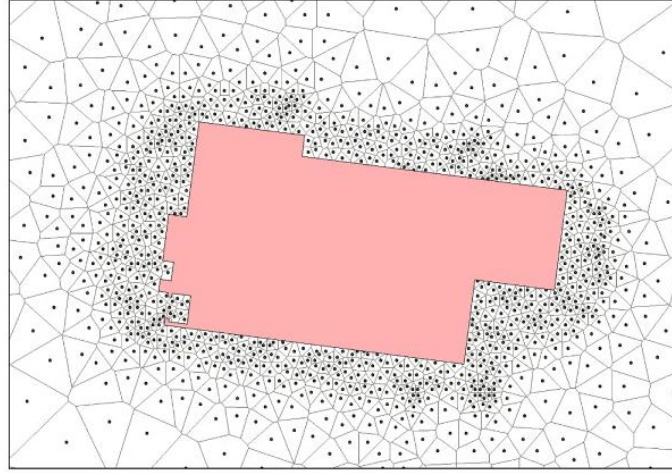


Şekil 6.8’de, CBS ile görselleştirilen taşkın simülasyonu, ev çevresindeki su derinliği ve akış hızının mekân-zaman dağılımını yansıtmaktadır. Analizde kapı, pencere ve havalandırma gibi sızma noktaları derinlik ve basınca göre belirlenmiş, iç ve dış su seviyesi dengelenerek hidrostatik basınç azalmıştır. Sel parametreleri ArcGIS’te yapılan Voronoi diyagramlarıyla bina cephesine uygulanmış ve hasar analizi yapılmıştır (Şekil 6.9). Su teması kaynaklı hasarlar alçıpan, yalıtım, süpürgelik, iç kapılar, zemin kaplamaları, cihazlar ve bir pencereyi etkilemiş ancak dış kaplama ve seramik yüzeyler zarar görmemiştir [297].

Şekil 6.8 Taşkın Simülasyon Görselleştirilmesi [297]

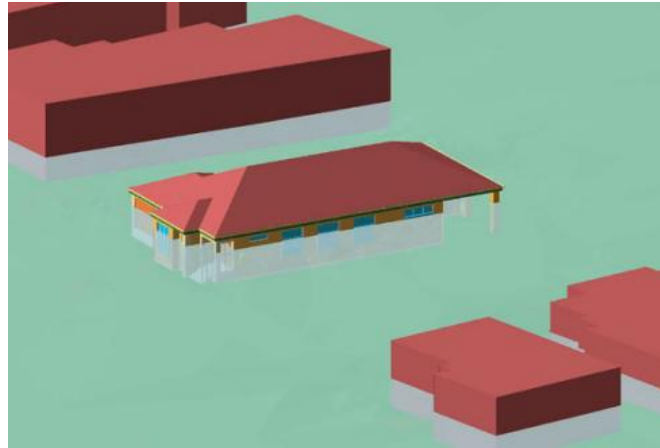


Şekil 6.9 Taşkın Noktalarına Göre Oluşturulan Voronoi Diyagramı ve Cephelerle Mekânsal Eşleştirme [297]



Çalışmada sel olayının bina bileşenleri üzerindeki etkileri (hidrostatik, hidrodinamik, kaldırma, su teması) hesaplanarak fiziksel hasar değerlendirilmiştir. Analiz her zaman diliminde su sızması ve yük aktarımı üzerinden yapılmış, bu yükler bileşen dayanımlarıyla karşılaştırılarak hasar düzeyleri belirlenmiştir. Yapısal bütünlük her adımda izlenmiştir [297].

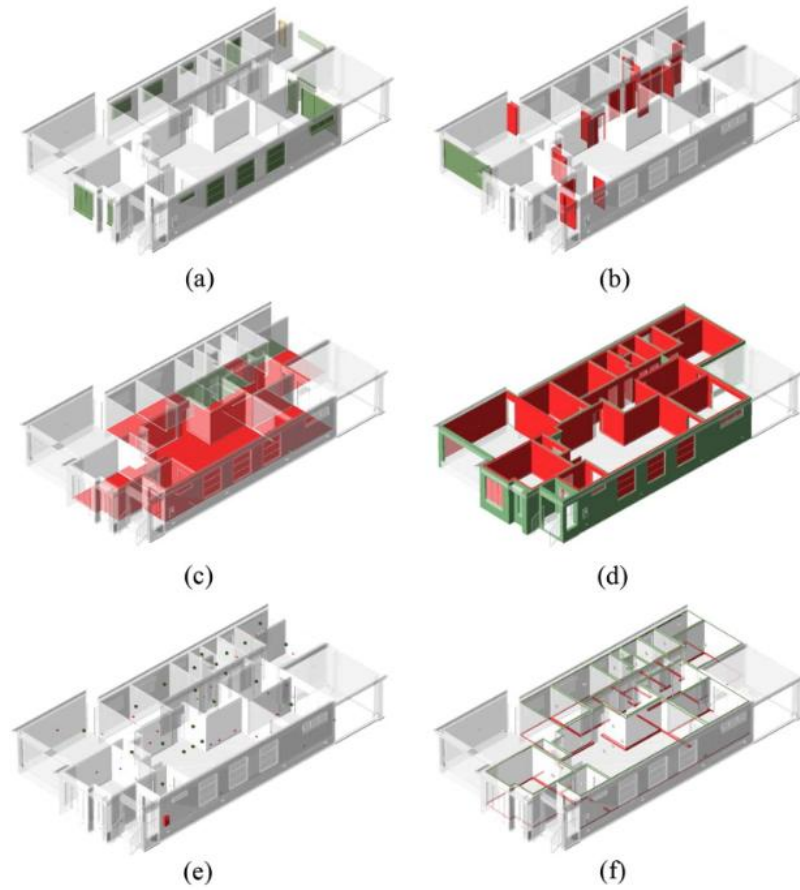
Şekil 6.10 ArcScene Üzerinden Binanın CityGML Modeli ile Su Altında Kalan Kısımlarının 3B Görselleştirilmesi [297]



Fiziksel hasar ve kayıp miktarının belirlenmesi aşamasında her bir hasarlı bileşenin maliyeti, hasar durumuna, gerekli müdahaleye (onarım veya değiştirme) ve birim maliyetine göre hesaplanır. Toplam bina hasarı, tüm bileşenlerin hasar

maliyetlerinin toplamı olarak bulunur. Toplam hasar maliyeti, bina değerinin belirli bir eşiğini (genellikle %50-60) aşarsa binanın tamamen değiştirilmesi önerilir. Bu çalışmada toplam hasar maliyeti 51.410 Avustralya doları şeklinde hesaplanmıştır. Hasar, ArcScene (Şekil 6.10) kullanılarak 3B olarak görselleştirilmiştir. Farklı bileşen katmanları (pencereler, kapılar, zeminler, duvarlar vb.) hasar durumlarına göre (örn. kırmızı = hasarlı/değiştirilmesi gereken, yeşil = hasarsız) renklendirilerek sunulmuştur (Şekil 6.11). Çalışmanın bulguları, BIM ve CBS entegrasyonunun sel hasar analizinde mevcut yöntemleri destekleyici nitelikte güçlü bir potansiyel sunduğunu göstermektedir [297].

Şekil 6.11 Bina İçindeki Hasar Alan Yerlerin Gösterilmesi [297]

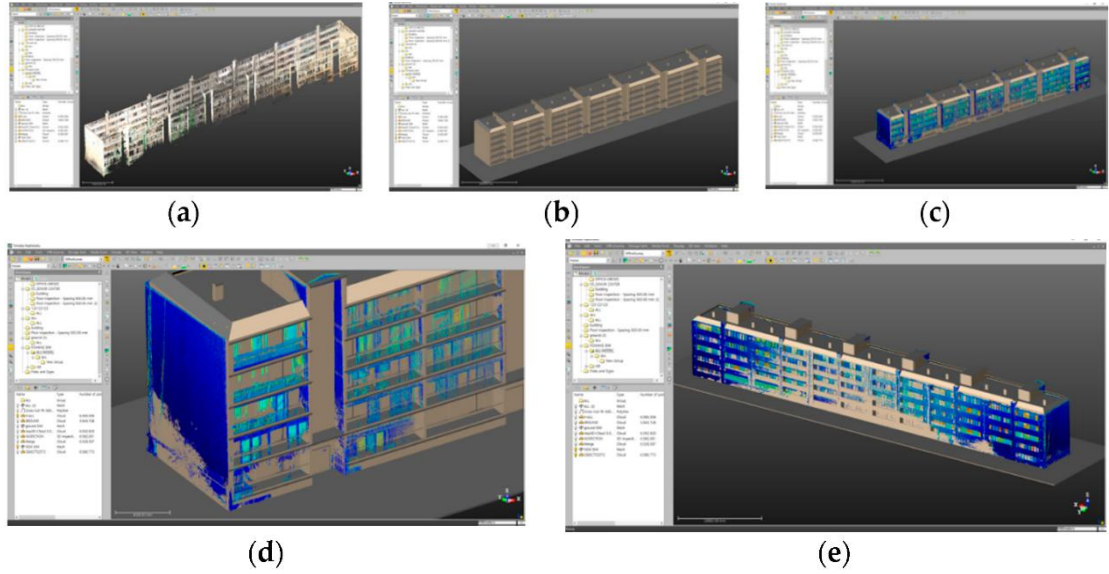


Hasarlı (a) pencerelerin, (b) kapıların, (c) döşemelerin, (d) duvarların (kaplama, yalıtım ve astar için bağımsız olarak), (e) tavan ışıklarının ve elektrikli cihazların ve (f) süpürgelik ve pervazların 3B görselleştirilmesi.

6.7.4.2 Deprem Hasarı Analizi Örneği

Güney Kore'nin Pohang kentinde 2017 yılında meydana gelen depremde ağır hasar gören Daeseong Apartmanı üzerinde, BIM ve nokta bulutu verileri kullanılarak detaylı bir risk analizi gerçekleştirilmiştir. Deprem öncesi olarak binaya ait 2B planlarla binanın BIM modeli çizilmiş ardından 3B Lazer Tarayıcılarla taranarak binanın dış cephesi nokta bulutlarıyla oluşturulmuştur [298].

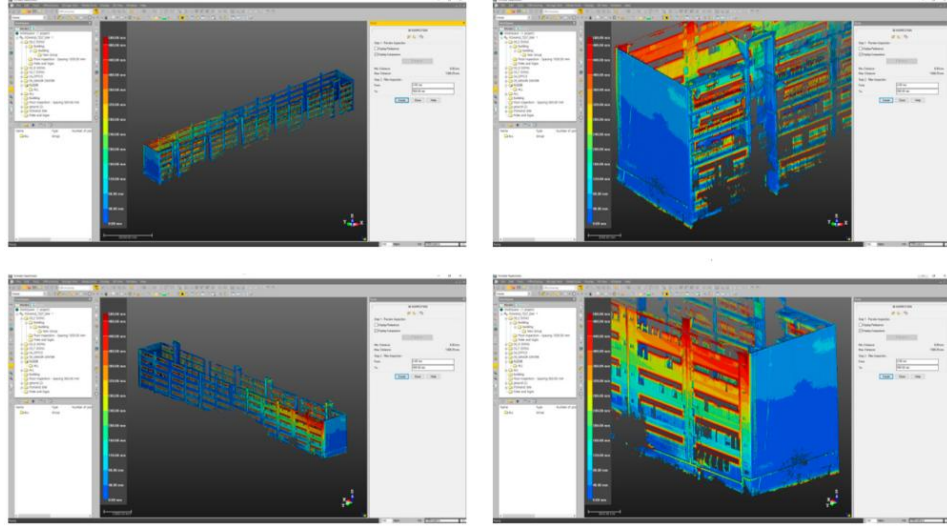
Şekil 6.12 Binaya ait Nokta Bulutu ve BIM Verilerinin Birleşimi [298]



a) Nokta bulutu verileri, b) BIM verileri, c) Veri birleşimi, d) BIM verileriyle birleştirilmiş nokta bulutu verilerinin yakın görünümü, e) BIM verileriyle birleştirilmiş nokta bulutu verileri

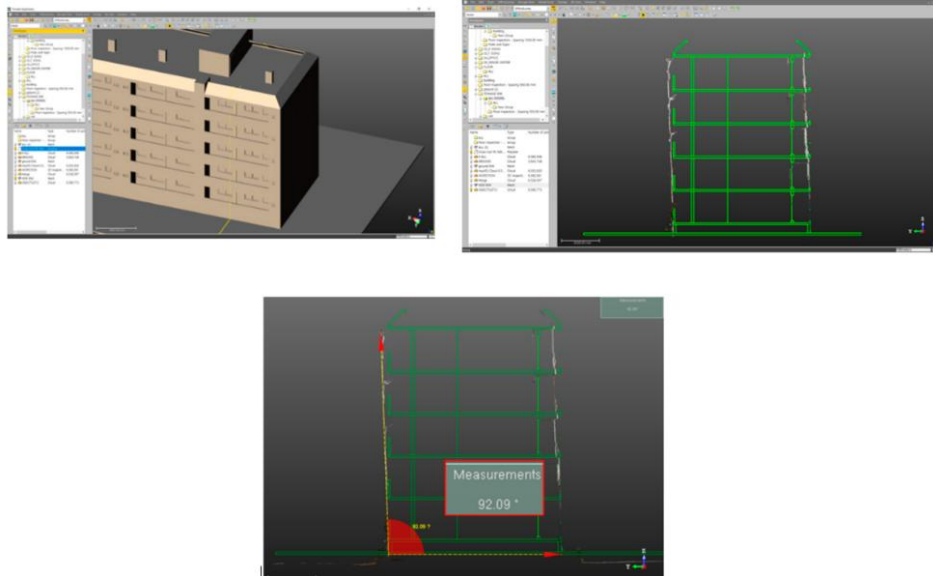
Şekil 6.12’de mavi renk ile gösterilen nokta bulutu verileridir ve depremden sonraki gerçek hasarı temsil eder. Gri renk ise binanın hasarsız durumunu gösterir [298]. BIM ve nokta bulutu verilerinin çakıştırılması sonucunda sırayla mavi, yeşil, turuncu ve kırmızı olmak üzere değerler atanmıştır. Mavi renk 0-80 mm, yeşil ve turuncu 150-360 mm, kırmızı renk ise 360-500 mm arası değişikliği göstermektedir (Şekil 6.13) [298].

Şekil 6.13 Nokta Bulutu ve BIM Verileri ile Analiz Sonucunun Gösterimi [298]



Yapı genelinde, 2.09° eğim ve duvarın üst kısmı alt kısmına oranla 88 mm öne eğimli olduğu tespit edilmiş ve bu sonuç yapının zayıf zemin koşulları ve kısa kolon etkisi nedeniyle yana doğru yattığını göstermektedir. Yapının çevresindeki zemin düzlemlerinde ise 760 mm'ye kadar yer değiştirme ölçülmüştür (Şekil 6.14). Bulgular, zeminde ciddi oturma ve kaymaların meydana geldiğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak BIM ve nokta bulutu verilerinin birleşimi, özellikle dijital planların bulunmadığı eski yapılarda deprem hasarını hızlı, doğru ve nicel verilerle değerlendirmeyi sağlamaktadır [298].

Şekil 6.14 Binanın BIM kesiti ve Eğim Analizi Sonuçları [298]



6.8 BIM ve CBS Teknikleriyle Bina Yangın Senaryolarının Geliştirilmesi

Tashakkori ve ekibi, acil durumlar için geliştirdikleri 3B Kapalı Acil Durum Mekânsal Modeli ile itfaiye gibi ekiplerin yalnızca kritik bina bilgilerine (iç mekân düzeni, yangın ekipmanı konumları, dış çevre) erişmesini sağlayarak operasyonel verimliliği artırmıştır [284].

Yangın ve diğer afet senaryolarında, BIM-CBS tabanlı analizler çok boyutlu geometrik görünüşleri ve sensör verilerini değerlendirerek risklerin daha doğru belirlenmesine yardımcı olur. Analizler, tahliye yollarının yanı sıra iç ve dış mekânlar arasındaki etkileşimleri de dikkate alır, böylece risk değerlendirmeleri daha kapsamlı şekilde yapılabilir [283].

Geliştirilen çok amaçlı geometrik ağ modeli (*Geometric Network Model*), bina içindeki geçilebilir unsurları (koridorlar, geçitler, açıklıklar vb.) ve dış yol ağlarını otomatik olarak birbirine bağlayarak tahliye yollarını daha etkili planlamaya olanak tanır. Geleneksel 2B yöntemlerden farklı olarak sadece giriş ve çıkış noktalarıyla sınırlı kalmayıp tüm geçilebilir alanları hesaba katarak daha güvenli ve kısa kaçış rotaları oluşturulması sağlanmıştır [283].

Xu ve ekibi, deprem sonrası bina durumunu değerlendirmek için BIM-CBS tabanlı bir model geliştirmiştir. Hasar simülasyonlarını BIM'e aktararak yeniden inşa ve yenileme maliyetlerinin tahmini sağlanmıştır [291].

Işıkdag ve ekibi ise yangına müdahale sürecinde, BIM-CBS verilerini birleştirerek en yakın itfaiye istasyonunun otomatik olarak belirlenmesini sağlamış ve böylece müdahale süresini azaltmayı amaçlamıştır [299].

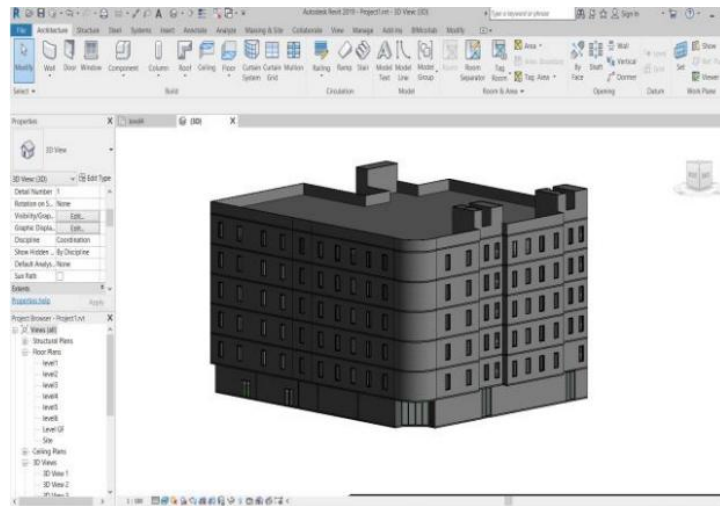
Yangın Dinamikleri Simülatörü ile birlikte kullanılan 3B geometrik ağ modeli binadaki tehlikeli bölgeleri, duman yoğunluklarını ve sıcaklık dağılımını simüle ederek, en kısa güvenli tahliye yolunun oluşturulmasına yardımcı olur. BIM, bu süreçte gerekli verileri sunarak yangın senaryolarının daha gerçekçi şekilde modellenmesini sağlar [300].

Bi ve ekibi, BIM tabanlı 3B bina modellerini Skyline 3B CBS platformu ile entegre ederek bina içi yangın alarm sistemleriyle ilişkilendirerek dinamik bir yangın kontrol sistemi tasarlamıştır. Modelde geometrik analiz ve yangın algılama verileriyle bina içi kaçış rotaları sürekli güncellenmiş ve müdahale planları optimize edilmiştir [301].

6.8.1 Yangın Anı İçin Güvenli Tahliye Senaryoları

Atyabi ve ekibi tarafından gerçekleştirilen çalışmada, iç mekânlarda oluşabilecek yangın gibi afet senaryolarında bina içi acil tahliye yollarını optimize ederek en kısa ve en güvenli güzergâhların belirlenmesi amaçlanmıştır. İran'ın Tahrân kentinde yer alan altı katlı ve yaklaşık 2000 m²'lik ticari bir yapı olan "SevenCenter" alışveriş merkezi pilot bölge olarak seçilmiştir. Yapıya ait 2B CAD çizimleri Revit yazılımı ile üç boyutlu BIM modeline dönüştürülmüştür (Şekil 6.15). Modelde mimari öğeler, merdivenler, kapılar, koridorlar ve acil çıkışlar dâhil olmak üzere ayrıntılı bina bileşenleri modellenmiş, semantik bilgiler de entegre edilmiştir. BIM modeli daha sonra IFC formatında dışa aktarılmıştır [302].

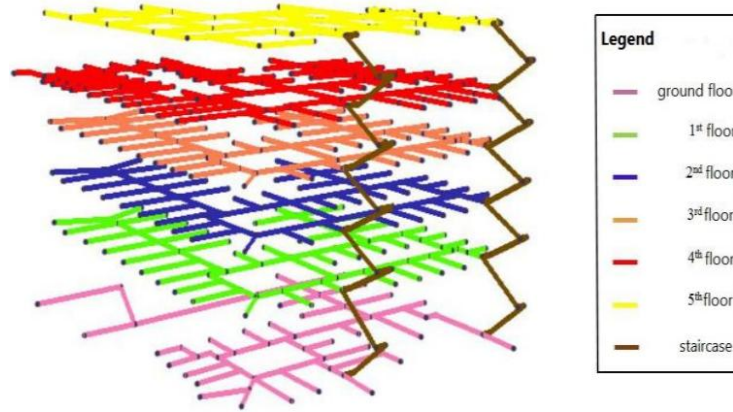
Şekil 6.15 SevenCenter Alışveriş Merkezine Ait BIM Modeli [302]



BIM modeli, ArcGIS ortamına aktarılmış ve her bir IFC nesnesi ayrı bir katman olarak temsil edilmiştir. Ardından, bina içi hareketliliği simüle edebilmek için geometrik bir ağ modeli oluşturulmuştur (Şekil 6.16). Oluşturulan modelde odalar, koridorlar ve merdivenler gibi alanlar düğüm noktaları olarak tanımlanmış,

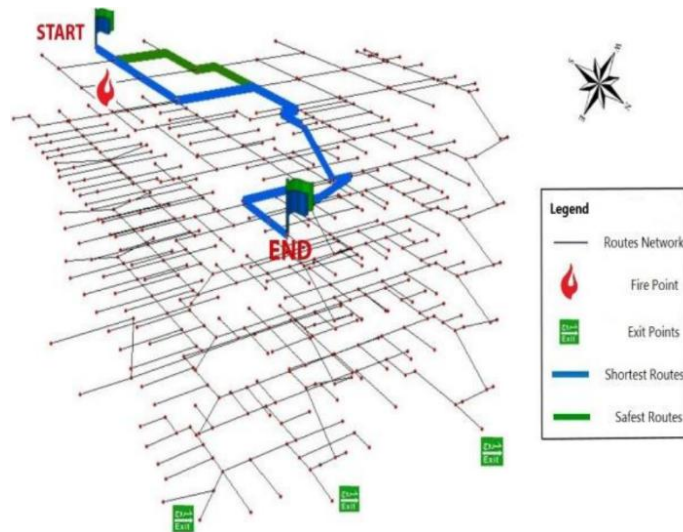
aralarındaki geçişler bağlantılar şeklinde modellenmiştir. Her bir ticari birim, katlar boyunca sayısallaştırılmış ve yönlendirme analizine uygun bir ağ yapısı kurgulanmıştır. En son her katın ağ yapısı ayrı ayrı modellenmiş, katlar arasındaki geçişler merdivenler aracılığıyla birleştirilmiş ve bütüncül bir geometrik ağ modeli ortaya çıkarılmıştır [302].

Şekil 6.16 Bina İçi Geometrik Ağ Modeli [302]



Rota analizlerinde “Ağ Analizi (*Network Analyst* – ArcGIS)” temelli bu yöntemle en kısa ve en güvenli yollar analiz edilmiştir. Rota güvenliği belirlenirken kapasite yükü (*occupancy load*), çıkış genişliği, yangın başlangıç noktasına mesafe, malzeme alev alma özelliği (*flammability*) şeklinde dört kriter esas alınmıştır [302].

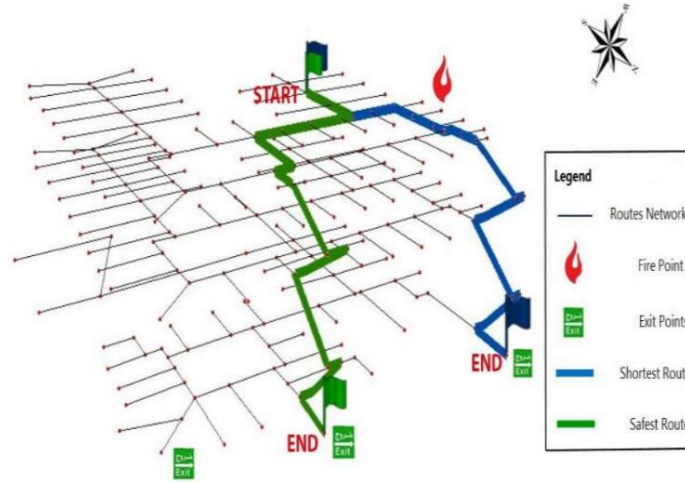
Şekil 6.17 Restoran Yangını Tahliye Senaryosu [302]



Toplamda 6 farklı yangın senaryo gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birinde, beşinci katta yer alan restoran biriminde yangın çıktığı varsayılmıştır. Bina çatısı, eğimli formu ve çevredeki yapılarla hizalı olmaması nedeniyle tahliye için uygun değildir. Bu nedenle tahliye yangın merdiveni kullanılarak bir alt kata inip pencere aracılığıyla gerçekleşmiştir. En kısa rota 86.502 m, en güvenli rota 86.531 m ve tahliye süresi her iki rota için yaklaşık 202.85–202.87 saniye olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.17’de görüldüğü üzere en kısa rota mavi renk ile en güvenli rota ise yeşil renk ile gösterilmiştir [302].

Bir başka senaryoda ise ikinci katta yer alan avize ve aydınlatma mağazasında çıkan bir yangın durumu işlenmiştir (Şekil 6.18). Merdivenin yukarı yönü kapalı, pencere tahliyesi mümkün değildir. Bu nedenle tahliye aşağı yönlü merdivenle yapılmıştır. En kısa rota 63.934 m, en güvenli rota 72.876 m ve tahliye süresi 64.23 sn (kısa) ve 71.68 sn (güvenli) olarak hesaplanmıştır [302].

Şekil 6.18 Aydınlatma Mağazası Yangını Tahliye Senaryosu [302]



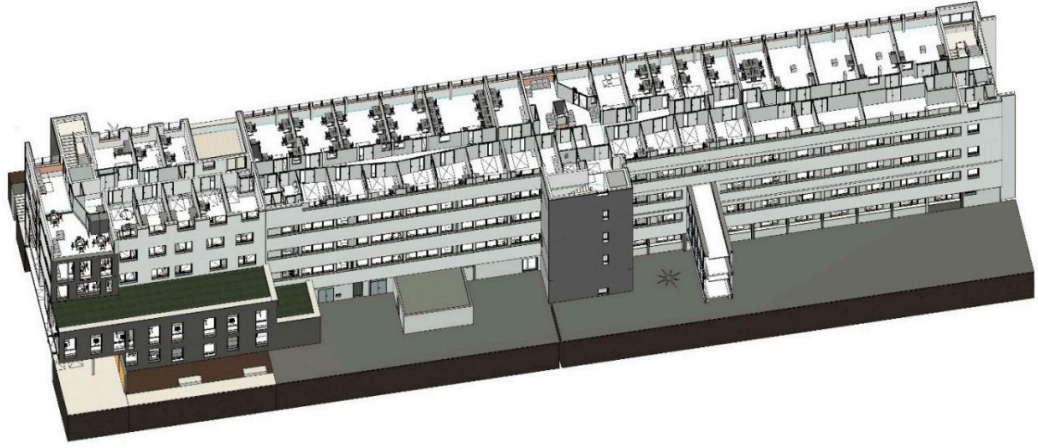
Sonuç olarak, BIM modeli sayesinde yapı hakkında detaylı geometrik ve semantik bilgiye erişim sağlanırken CBS tabanlı ağ analizi ile hem kısa hem güvenli rotaların belirlenmesi mümkündür. En kısa rota, genellikle zamansal avantaj sunsa da bazı durumlarda yangın güvenliği açısından riskli olabilir. En güvenli rota, yangına daha uzak, daha az yanıcı malzeme bulunan, daha geniş çıkışlara yönlendiren güzergâhları tercih etmektedir. Gerçek zamanlı karar destek sistemi olarak afet senaryolarında

doğrudan uygulanabilir örnek bir çözüm sunulmuştur. Yangın güvenliği açısından tasarım öncesi planlamaya katkı sunmaktadır [302].

6.8.2 Akıllı Yangın Tahliye Yönetim Sistemi

Fransa'daki Lille Üniversitesi'nde Wehbe ve ekibi tarafından yapılan bu çalışmanın amacı yangın anında bina kullanıcılarının güvenli tahliyesini sağlamak amacıyla BIM ve akıllı teknolojileri bir araya getiren entegre bir sistem geliştirmektir. Geliştirilen sistem yangının erken algılanması, ortam verilerinin analiz edilmesi, en güvenli tahliye yollarının belirlenmesi ve bu bilgilerin kullanıcılarla anlık olarak paylaşılmasını hedeflemektedir [303].

Şekil 6.19 Lille Üniversitesi Binası BIM Modeli [303]

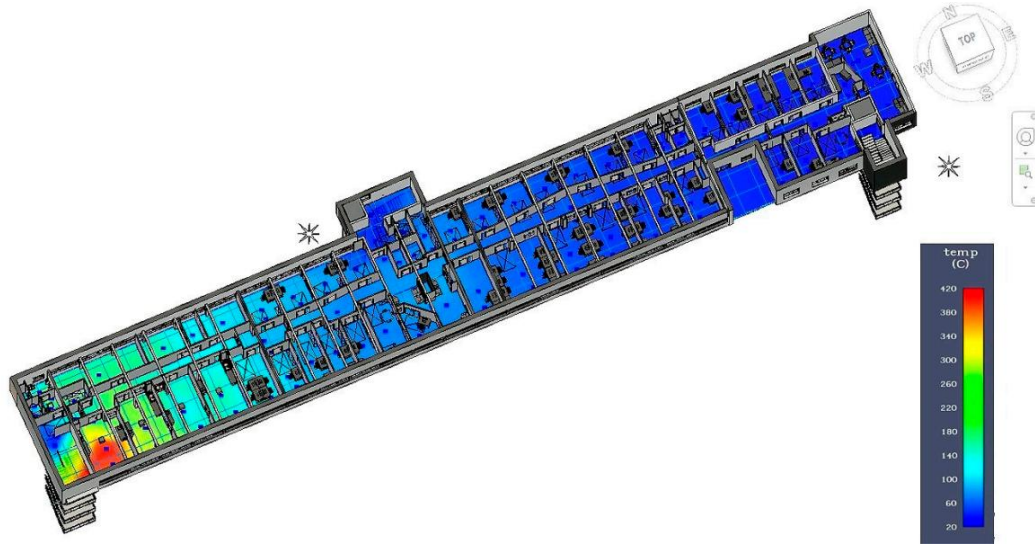


Akıllı yangın tahliye yönetim sistemi, öncelikle binanın geometrik yapısı, yapı malzemeleri ve yangın algılama sistemleri, malzemelerin yanıcılık özellikleri gibi fiziksel bilgiler BIM'e entegre edilmiştir. Ardından sıcaklık, duman ve insan hareketlerini gerçek zamanlı izleyen sensör verileriyle çalışan bir izleme katmanı bulunur. Toplanan veriler, akıllı bir platformda işlenerek farklı yangın senaryolarına göre en uygun tahliye rotaları simüle edilir. Yapay zekâ desteğiyle en etkili müdahale planı otomatik olarak belirlenir. Yangın algılandığında devreye giren kontrol ve uyarı katmanı ışık, sesli yönlendirme, ekipman kontrolü ve duman yönetimi gibi savunma önlemlerini devreye sokar. Sistemin en üst katmanında yer alan akıllı hizmetler modülü ise yangının yeri, nedeni, etkisi ve tahliye seçeneklerini kullanıcıya sunarak

hızlı ve doğru karar verilmesini sağlar. BIM LOD300 seviyesinde modelleme gerektiren sistem, Dynamo aracılığıyla gelişmiş veri analizleri sunar. Tüm yapı, test edilmiş görüş mesafesi, sıcaklık ve karbon monoksit limitlerini esas alarak güvenli ve etkili tahliye süreçlerini destekler [303].

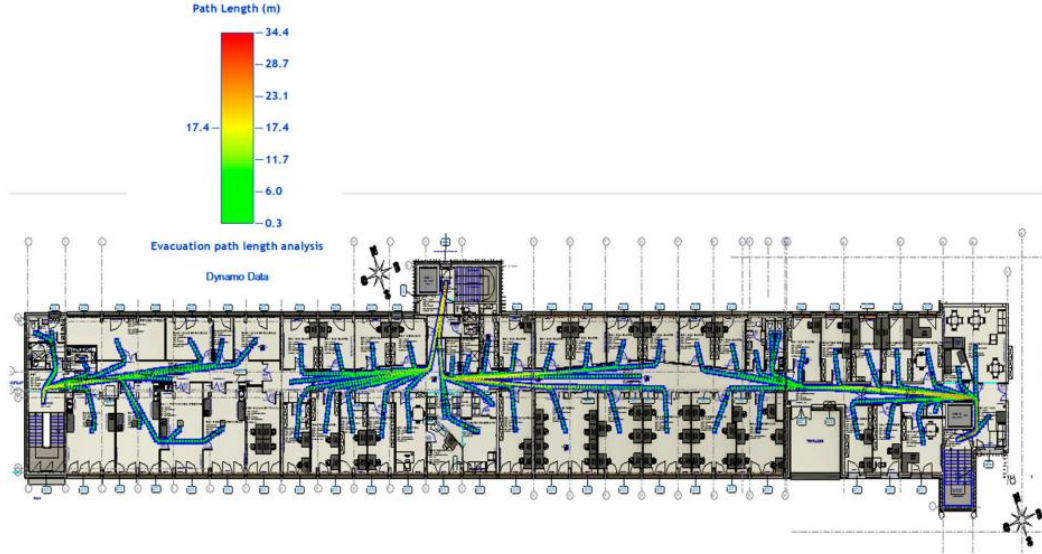
Pilot uygulama, Lille Üniversitesi'ne ait araştırma binasının 4. Katındaki laboratuvarlarda yapılmıştır. 1256 m² büyüklüğündeki bu alanda yaklaşık 50 kişi (akademik personel, doktora öğrencileri ve teknik ekip) çalışmaktadır (Şekil 6.19). İlk senaryoda mutfakta başlayan yangın, çıkış kapısı 1'i kısa sürede kullanılamaz hâle getirmiştir. 250. saniyede mutfakta sıcaklık 420°C'ye, çevrede 100°C'nin üzerine çıkarken, uzak odalarda 60°C'nin altında kalmıştır. Harita, yangının yayılım yönünü ve etki alanlarını göstermektedir (Şekil 6.20) [303].

Şekil 6.20 Yangın Anı Isı Haritası – Mutfak Yangını Senaryosu [303]

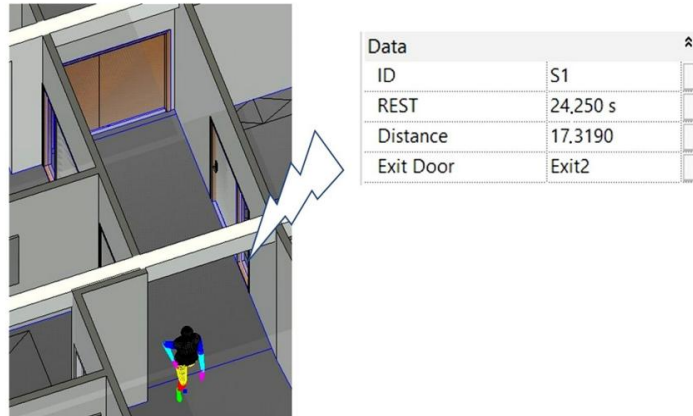


Diğer senaryoda ise elektrik odasında meydana gelen kısa devre kaynaklı yangın, çıkış kapısı 2'yi etkilemiştir. Buradaki görünürlük 83. saniyede kaybolmuş, böylece kullanıcıların bu çıkıştan uzaklaştırılması gerekmiştir (Şekli 6.21) [303].

Şekil 6.21 Tahliye Rotalarının BIM Ortamında Gösterimi [303]



Şekil 6.22 BIM Modeli Üzerinden Kullanıcıların Tanımlanması [303]



Sistem BIM modeli üzerinden her kullanıcıyı tanımlayarak mevcut konum, yangının yayılımı ve çıkış yollarının durumuna göre en uygun tahliye rotasını belirleyerek kullanıcıya bildirim olarak iletmektedir (Şekil 6.22). Gerçek zamanlı yönlendirme sağlayan bu yapı, sistemin en yenilikçi özelliklerinden biridir. Sonuç olarak BIM tabanlı yangın senaryoları yangının yayılımını izlemeyi, simülasyon verileriyle tahliye kararlarını desteklemeyi ve gerçek zamanlı yönlendirmeyle kullanıcı güvenliğini artırmaktadır. Bu tarz sistemler kullanıcıya özel çözümleriyle BIM–CBS entegrasyonunun afet anındaki katkılarını somutlaştıracaktır [303].

BÖLÜM 7

UYGULAMA

IFC VERİLERİNİN CITYGML FORMATINA DÖNÜŞTÜRÜLMESİ

Yedinci bölümde, IFC formatındaki model, 3B CBS analizlerinde yaygın olarak kullanılan CityGML formatına dönüştürülmüştür. Literatürdeki bulguların yanı sıra, TUCBS Bina Veri Teması ile CityGML arasındaki kavramsal eşleştirilebilirlik bu tercihi desteklemiştir. Açık OGC standardı olması, LoD0–LoD4 aralığında çok ölçekli temsil sunması ve tematik sınıflar aracılığıyla semantik bütünlüğü koruyabilmesi de bu seçimde belirleyici olmuştur. Dönüşüm, FME (*Feature Manipulation Engine*) Workbench uygulaması kullanılarak mimari ve yapısal model üzerinden gerçekleştirilmiştir. FME, farklı formatlardaki verileri içe aktarım dönüştürerek, istenilen formata veya yapıya uygun şekilde dışa aktarım yapmayı sağlayan güçlü bir veri entegrasyon ve dönüşüm platformudur. Bölüm 5’te BIM’den CBS’ye geçişte farklı yaklaşımlara değinilmiş olup bu yaklaşımlardan “Veri Kümesi Odaklı” yaklaşım tercih edilmiştir. BIM’den CBS’ye veri aktarımında yaygın olarak kullanılmasına rağmen bu yaklaşım literatürde en zorlu dönüşüm olarak değerlendirilmektedir. Bu dönüşüm, BIM’in şehir modelleri için standart bir formata dönüştürülmesini sağlayarak 3B şehir modellemesi, kentsel analiz ve simülasyon gibi uygulamalarda kullanılabilir hale getirir.

IFC ve CityGML, her ikisi de hiyerarşik veri yapısına sahiptir fakat IFC’nin yapısı daha karmaşıktır ve CityGML’de yer almayan ara öğeleri barındırır. Örneğin, IFC’de kapılar öncelikle “Açıklık” (*Opening*) nesnesine bağlıdır ve duvarların alt öğesi olarak tanımlanır. CityGML’de ise kapılar doğrudan duvarlara bağlıdır. Benzer şekilde, pencerelerin veya merdivenlerin bazı bileşenleri IFC’de “*Member*” sınıfı altında bulunur ve CityGML’e dönüştürülürken kendi ana öğelerine eklenmeleri gerekir.

Dönüşüm süreci, yüksek detay seviyesine sahip bir IFC modelinin CityGML formatına uyarlanmasına odaklanmaktadır. Uygulama, IFC verisini LOD300 seviyesinden CityGML’in LoD4 düzeyine dönüştürür. LoD4 düzeyi ile model hem geometri hem de öznitelik bakımından ayrıntılı bir şekilde temsil edilmektedir.

Geliştirilen iş akışı, mimari nesne ağırlıklı IFC veri setlerinin büyük çoğunluğunu işleyebilecek kapsamda tasarlanmıştır.

Dönüşüm sürecinde IFC modelinin karmaşık hiyerarşisi önce FME üzerinde çözümlenmiş, ardından CityGML şemasına uygun şekilde yeniden yapılandırılmıştır. Bu aşamada gereksiz ara nesneler elenmiş, geometri tipleri dönüştürülmüş ve her nesne kendi ana ögesiyle ilişkilendirilmiştir. LoD seviyesine göre filtreleme yapılarak, detay yoğunluğu hedeflenen CityGML LoD4 standardına uyarlanmıştır. Öznitelik eşleştirme adımlarında, IFC'deki sınıf adları ve özellikler CityGML karşılıklarıyla eşleştirilmiş ve eksik kalan bileşenler en benzer hiyerarşik üst birime eklenmiştir. Böylece model konumsal doğruluğunu koruyarak yapısal ve görsel açıdan CityGML standartlarına uygun hale getirilmiştir.

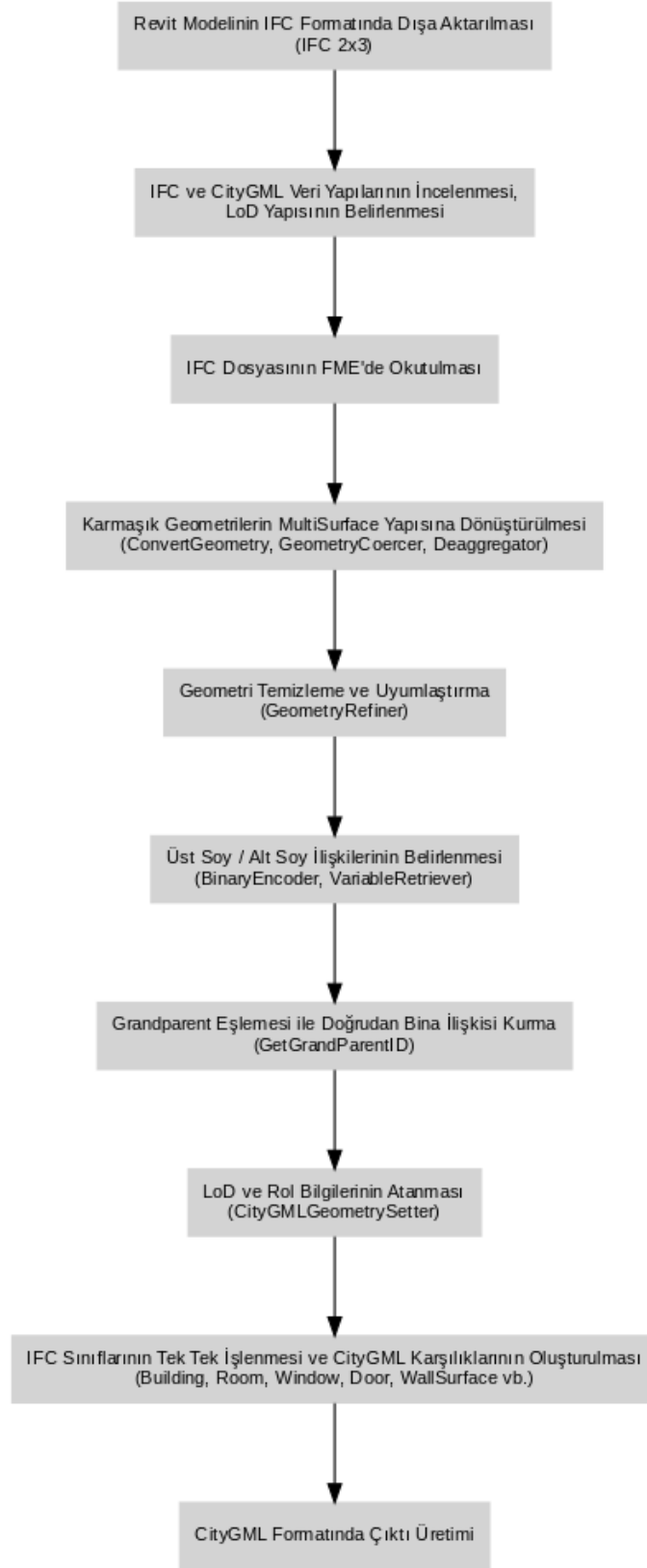
Tablo 7.1 Uygulamada Kullanılan Programlar ve Versiyonları

Program Adı	Versiyon
FME Workbench	2025.0.1
KIT Model Viewer	7.3
Solibri Anywhere (Desktop)	25.6.0

Uygulama sürecinde kullanılan programlar Tablo 7.1'de gösterilmiştir. Solibri ve Kit Model Viewer sırayla IFC ve CityGML model çıktılarını görüntülemek için kullanılmıştır. FME ise IFC nesnelerini CityGML nesnelere uygun şekilde dönüştürmek için kullanılmıştır.

Şekil 7.1, FME üzerinde yürütülen geometrik ve semantik dönüşüm adımlarını kapsayarak tüm aşamaları ortaya koymaktadır.

Şekil 7.1 Dönüşüm İşlemine Ait İş Akış Şeması

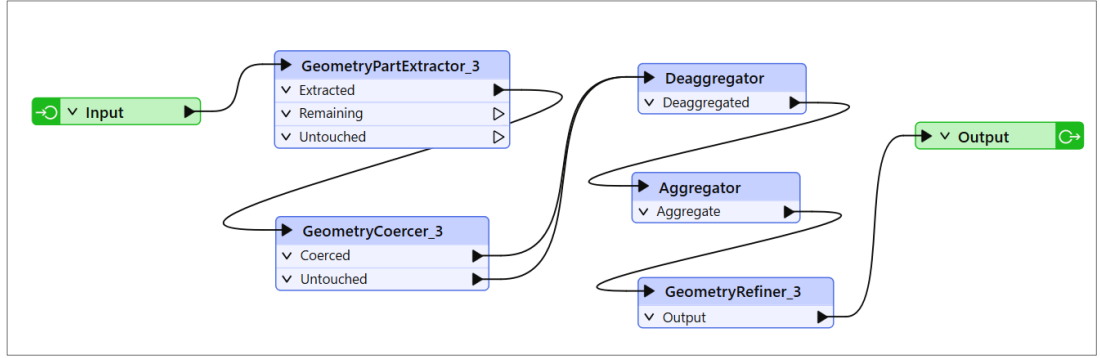


7.1 Ön Hazırlık İşlemleri

7.1.1 Karmaşık Geometrilerin MultiSurface Yapısına Dönüştürülmesi

CityGML, yüzey temelli bir modelleme yapısı kullandığı için, bu katı geometrilerin *MultiSurface* biçimine dönüştürülmesi gereklidir. Şekil 7.2’de, IFC verisinde sıkça karşılaşılan katı geometri tanımlarının (örn. *IfcFacetedBrep*, *IfcExtrudedAreaSolid*) doğrudan CityGML’e aktarılmasında yaşanan uyumsuzlukları gidermeyi hedefler.

Şekil 7.2 FME Üzerinde Geometrilerin Dönüşümü



İlk olarak *GeometryPartExtractor* ile IFC dosyasındaki yapı elemanlarının tüm geometrik bileşenleri ayrıştırılmış, yalnızca “Body” etiketi taşıyan ve elemanın gerçek fiziksel formunu temsil eden ana geometriler seçilmiştir. Böylece görsel amaçlı veya ikincil nitelikteki parçalar ayıklanmış, modelin fiziksel yapısına en yakın bileşenler esas alınmıştır.

Ardından *GeometryCoercer* devreye girerek bu gövde geometrilerini *MultiSurface* formatına dönüştürmüştür. *IfcSolidModel* gibi hacim tabanlı gösterimlerin yüzey tabanlı bir forma uyarlanmasını sağlayan bu işlemler veriyi CityGML ile tam uyumlu hâle getirir.

Deaggregator aşamasında, IFC’deki karmaşık ve iç içe geçmiş geometri yapıları parçalara ayrılmış, yüzeylere dönüştürülmüş ve CityGML’in anlayabileceği sade bir form elde edilmiştir. Ardından *Aggregator* yardımıyla bu yüzeyler tekrar bir

araya getirilerek bütüncül bir *MultiSurface* yapısı oluşturulmuştur. Böylece geometrik bütünlük korunarak CityGML'in geometrik yapısına uyum sağlanmıştır.

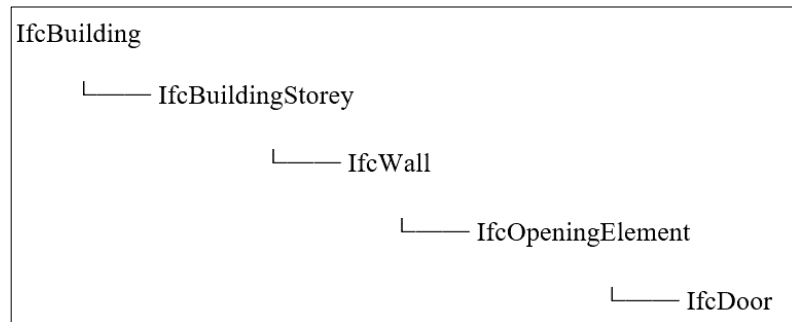
Son olarak *GeometryRefiner*, topolojik ve geometrik tutarsızlıkları ortadan kaldırmıştır. Duvar yüzeyindeki milimetrik boşluklar, çakışan kenarlar veya içe dönük yüzeyler tespit edilerek düzeltilmiş, kenar hizalamaları yapılarak modelin geometrik bütünlüğü pekiştirilmiştir. Tüm bu işlemler sonucunda CityGML şemasına uygun, temiz ve hatasız bir veri seti elde edilmiştir.

7.1.2 Alt-Üst Nesne Hiyerarşisinin Belirlenmesi

IFC veri modeli nesneler arası hiyerarşi kurar ancak bu yapı genellikle doğrudan üst nesneye (*parent*) referans verir. Örneğin bir *IfcDoor* nesnesi, yalnızca bağlı olduğu *IfcWall* nesnesini tanıırken, bu duvarın hangi kata veya binaya ait olduğu bilgisi doğrudan yer almaz. Dönüşüm sürecinde *IfcOpeningElement* gibi ara nesneler filtrelendiğinde, kapı gibi elemanların üst yapılara olan bağlantısı kopma riski taşır. Bu nedenle veri aktarımında, yalnızca ebeveyn ilişkisi değil, kat ve bina gibi daha üst düzey yapılarla da bağ kurulması gerekir.

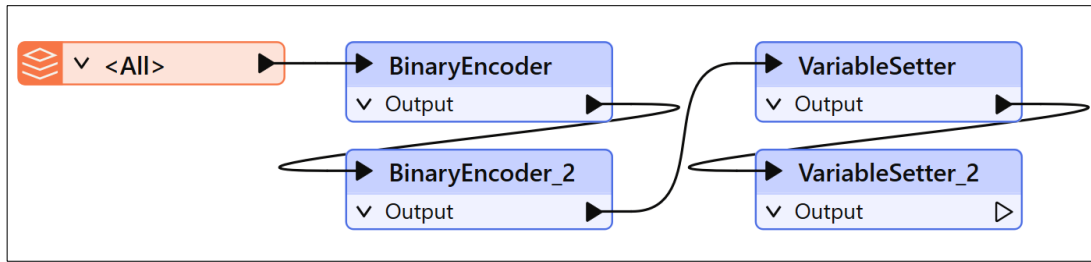
Şekil 7.3'te görüldüğü üzere, *IfcOpeningElement* çıkarılsa bile *IfcDoor*'un *IfcWall* ya da doğrudan *IfcBuildingStorey* ile ilişkisini koruyabilmek için “*grandparent*” eşlemesi yapılır. FME'de bu mantık, değişkenlerle oluşturulan bir *LookUp* tablosu üzerinden uygulanmaktadır. *LookUp* tablosu ile kapı → duvar → kat → bina şeklinde eksiksiz bir mekânsal bağlam zinciri elde edilir. Gereksiz nesneler elenirken anlamlı ilişkiler korunur.

Şekil 7.3 IfcDoor Nesnesinin Hiyerarşik İlişkisinin Gösterimi



Şekil 7.4'teki iş akışında, IFC verisindeki hiyerarşik yapı çözülerek üst–alt ilişkiler açık şekilde tanımlanmıştır. Her nesnenin benzersiz kimliği (*ifc_unique_id*) ve bağlı olduğu üst nesnenin kimliği (*ifc_parent_unique_id*), *BinaryEncoder Transformer*'larıyla HEX formatına³¹ dönüştürülmüş ve *_unique_id* ile *_parent_id* özniteliklerinde saklanmıştır. HEX kodlama, özellikle büyük veri setlerinde karşılaştırma ve eşleştirme işlemlerinde önemli bir performans avantajı sağlar.

Şekil 7.4 Alt-Üst Nesne eşleştirme Tablosu



Ardından *_unique_id* ve *_parent_id* değerleri, *VariableSetter Transformer*'ları aracılığıyla global değişkenlere³² aktarılmıştır. Böylece her nesnenin üst ögesiyle olan bağlantısı, dönüşüm sürecinin ilerleyen adımlarında kolayca takip edilebilir hâle gelmiştir. İkinci *VariableSetter* bileşeninde ise *_unique_id* kimliği üzerinden nesnenin türünü belirten *fme_feature_type* bilgisi alınarak, her ögenin hangi IFC sınıfına ait olduğu kayıt altına alınmıştır. Örneğin bir nesnenin *IfcBuildingStorey* mi yoksa *IfcSite* mi olduğu bilgisi, hiyerarşik düzende doğru konumlandırma ve doğru CityGML sınıfıyla eşleştirme açısından kritik öneme sahiptir.

İşlemin sonunda, IFC modelindeki tüm nesneler için kimlik, üst öge ilişkisi ve tür bilgilerini içeren bir üst–alt soy eşleştirme tablosu (*LookUp table*) oluşturulmuştur. Bu yapı sayesinde *IfcOpeningElement* gibi ara öğeler güvenle ayıklanmış, nesnelerin yapısal bütünlüğü korunarak CityGML formatına aktarımı sağlanmıştır.

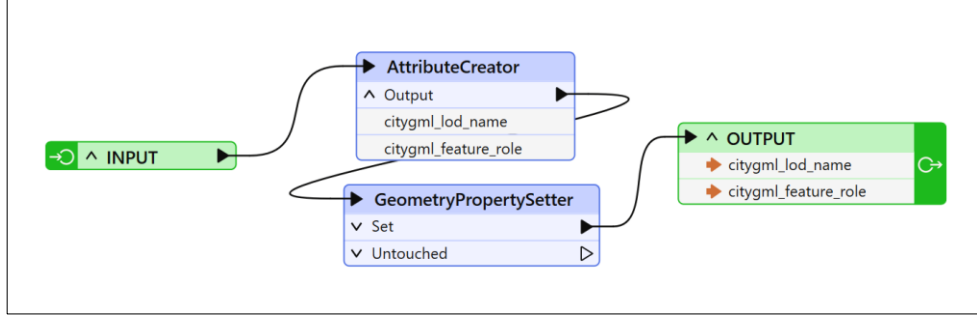
³¹ **HEX (Hexadecimal) formatı**, verilerin 16'lık sayı sisteminde temsil edilmesini sağlayan kodlama yöntemidir. Her dört bit, bir karakterle ifade edildiğinden, ikili (binary) verilere kıyasla daha kısa ve okunabilir. Büyük veri setlerinde, karşılaştırma ve eşleştirme işlemlerinin hızını artırarak performans avantajı sağlar.

³² **Global değişken**, programlama ve veri işleme ortamlarında tanımlandığında tüm süreç boyunca erişilebilen değişkendir. FME'de, farklı transformer'lar arasında veri aktarımını sağlayarak iş akışının ilerleyen adımlarında önceki değerlerin tekrar kullanılmasına imkân tanır.

7.1.3 CityGML LoD ve Rol Bilgilerinin Tanımlanması

Şekil 7.5’teki iş akışında, her nesneye ait detay seviyesi ve yapısal rol bilgisi tanımlanmıştır. IFC modelleri genellikle en ayrıntılı seviye olan LOD4’e karşılık geldiği için, tüm geometriler *LoD4MultiSurface* olarak işlenmiştir.

Şekil 7.5 LoD ve Nesne Rolünün Atanması



İş akışında, *GeometryPropertySetter* kullanılmıştır. İlk olarak *AttributeCreator* ile nesnelere LoD seviyesi (ör. LoD4) ve yapısal rol (ör. *WallSurface*, *RoofSurface*) öznitelikleri atanır. Ardından *GeometryPropertySetter* ile bu bilgiler nesnenin geometrisine işlenir. Böylece CityGML’e aktarılan her IFC nesnesi, detay seviyesi ve işlevsel rolüne göre doğru biçimde tanımlanır ve semantik uyum sağlanır.

7.2 IFC Sınıflarından CityGML Nesnelerinin Oluşturulması

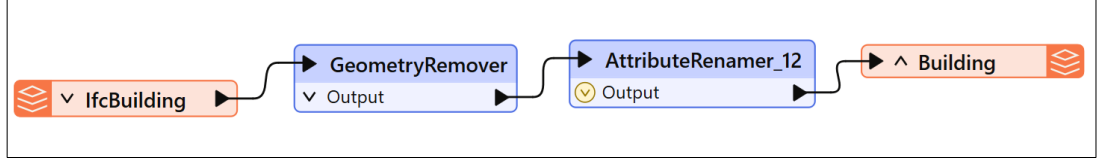
7.2.1 Building Nesnesinin Oluşturulması

Şekil 7.6, *IfcBuilding* sınıfının CityGML uyumlu bir yapıya dönüştürülme sürecini göstermektedir. İkinci bir IFC *Reader* bileşeni aracılığıyla doğrudan *IfcBuilding* (Bina) sınıfına ait veriler okunmuştur. CityGML’de bina nesnesi soyut bir varlık olarak tanımlandığından, bu seviyede geometri bilgisine ihtiyaç duyulmamış ve *GeometryRemover Transformer*’ı ile tüm geometri bileşenleri veri setinden çıkarılmıştır. Parametrelerde “*Remove Coordinate System*” seçeneği *No* olarak bırakılmış, böylece yalnızca geometri kaldırılmış, yerel koordinat sistemi korunmuştur.

Sonraki adımda, IFC ve CityGML’deki kimlik sistemleri arasındaki uyumu sağlamak amacıyla *AttributeRenamer* kullanılmıştır. IFC ortamında *ifc_unique_id*

olarak tanımlanan öznitelik, *gml_id* adıyla yeniden adlandırılmıştır. Adlandırma işlemi, CityGML standardında her nesnenin tanımlayıcı bir *gml:id* özneliği taşıma zorunluluğunu karşılamaktadır.

Şekil 7.6 CityGML Building Nesnesinin Oluşturulması

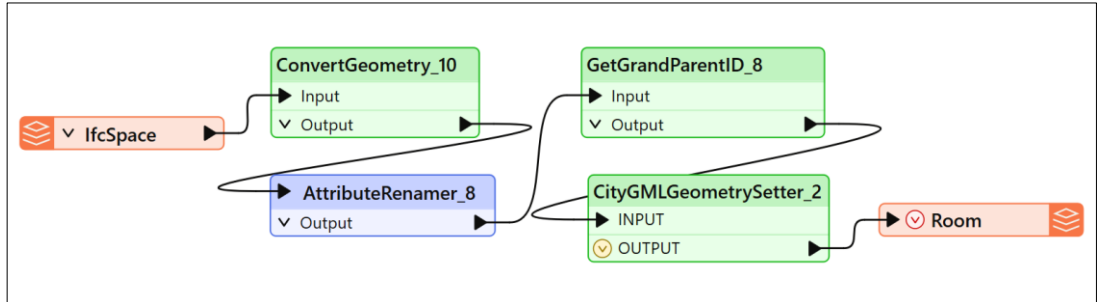


Sonuç olarak, geometrisi kaldırılmış *IfcBuilding* sınıfı, CityGML'in Building nesnesine başarıyla dönüştürülmüştür. Önceki adımlarda oluşturulan üst-alt soy eşlemesi sayesinde nesneye ait *gml_parent_id* bilgisi de eklenmiş ve bu sayede hem hiyerarşik bağlam hem de tanımlayıcı kimlik bilgileri korunarak CityGML'e uygun hale getirilmiştir.

7.2.2 Room Nesnesinin Oluşturulması

Dönüşümün ilk aşamasında, *IfcSpace*(oda)geometrisi çoğunlukla katı model (ör. *IfcSolidModel*) biçiminde tanımlandığından, *ConvertGeometry Transformer*'ı kullanılarak yüzey tabanlı bir yapıya dönüştürülmüş ve CityGML'in desteklediği *MultiSurface* formatına uyum sağlanmıştır.

Şekil 7.7 CityGML Room Nesnesinin Oluşturulması



Devamında *AttributeRenamer* ile *ifc_unique_id* özneliği *gml_id* olarak yeniden adlandırılmış, böylece CityGML'in kimlik sistemine uygun hale getirilmiştir. Sonraki adımda *GetGrandParentID Transformer*'ı aracılığıyla, *IfcBuildingStorey* gibi

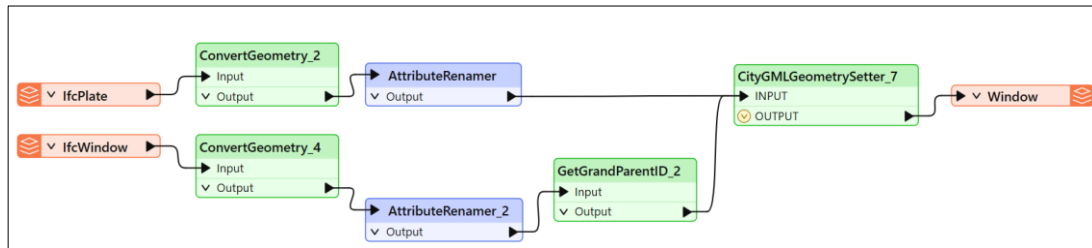
ara yapılar atlanarak doğrudan *IfcBuilding* nesnesine erişilmiş ve bu bilgi *gml_parent_id* alanına aktarılmıştır (Şekil 7.7).

Sürecin son aşamasında, *CityGMLGeometrySetter* ile oda nesnesine ait LOD bilgisi (*LoD4MultiSurface*) ve işlevsel rolü (*interiorRoom*) tanımlanmıştır. Kısacası, *IfcSpace* geometrik özellikleri, tanımlayıcı kimlikleri ve bağlamsal rolüyle birlikte CityGML'in *Room* sınıfı altında doğru şekilde modellenmiştir.

7.2.3 Window Nesnesinin Oluşturulması

Şekil 7.8'de gösterilen iş akışında, IFC modelinde pencereyi tanımlayan *IfcWindow* ile destek yüzeyini temsil eden *IfcPlate* nesneleri birlikte ele alınmış ve CityGML'deki *Window* sınıfına dönüştürülmüştür. Her iki IFC bileşeninin geometrisi, *ConvertGeometry Transformer*'ı ile sadeleştirilerek CityGML'in desteklediği yüzey tabanlı biçime uyarlanmıştır.

Şekil 7.8 CityGML Window Nesnesinin Oluşturulması



IfcPlate için *AttributeRenamer* kullanılarak *ifc_unique_id* ve *ifc_parent_unique_id* özellikleri sırasıyla *gml_id* ve *gml_parent_id* olarak yeniden adlandırılmıştır. *IfcWindow* için ise yalnızca *gml_id* tanımlanmış, ardından *GetGrandParentID Transformer*'ı ile pencere nesnesinin bağlı olduğu üst yapı (örneğin bina) belirlenmiştir. Bu adım CityGML'de nesnelerin doğrudan *Building* gibi üst sınıflara bağlanabilmesi açısından gereklidir.

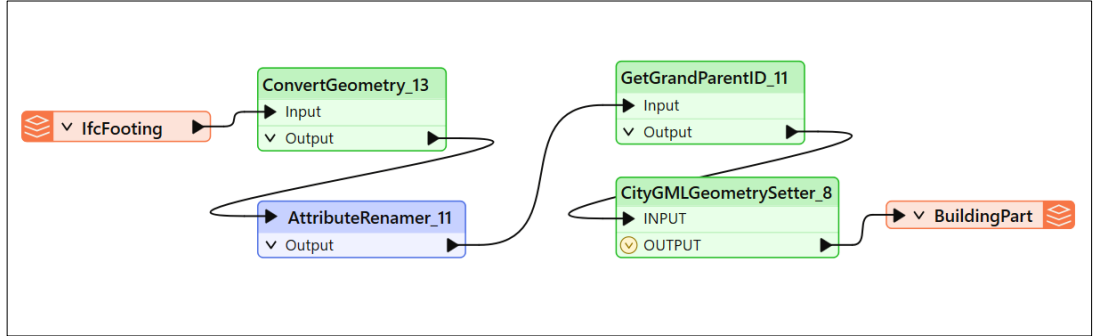
Sürecin sonunda *CityGMLGeometrySetter* yardımıyla tüm bilgiler geometriye işlenmiştir. *IfcWindow* nesnesine *LoD4MultiSurface* LoD seviyesi ve *opening* rolü atanmıştır. Böylece pencere bileşenleri, geometrik yapıları, kimlikleri ve bağlamsal ilişkileriyle birlikte CityGML'in *Window* sınıfı altında doğru şekilde modellenmiştir.

7.2.4 BuildingPart Nesnesinin Oluşturulması

Şekil 7.9'daki iş akışı, *IfcFooting* (bina temeli) sınıfına karşılık gelen yapı elemanlarının CityGML'de *BuildingPart* sınıfına doğru şekilde eşlenmesini hedeflemektedir. İlk aşamada, *ConvertGeometry Transformer*'ı kullanılarak bina temeli geometrisi katı model formatından yüzey tabanlı bir yapıya dönüştürülmüş ve CityGML'in desteklediği *LoD4MultiSurface* biçimine uyum sağlanmıştır.

Devamında *AttributeRenamer* ile nesnenin kendi kimliği *ifc_unique_id* ve üst nesnesine ait kimlik *ifc_parent_unique_id*, sırasıyla *gml_id* ve *gml_parent_id* olarak yeniden adlandırılmış ve böylece CityGML veri modeline geçişte gerekli olan kimlik eşlemesi yapılmıştır. Sonraki adımda *GetGrandParentID Transformer*'ı kullanılarak *gml_parent_id* üzerinden daha üst düzeydeki (*grandparent*) kimlik bilgisi güncellenmiştir.

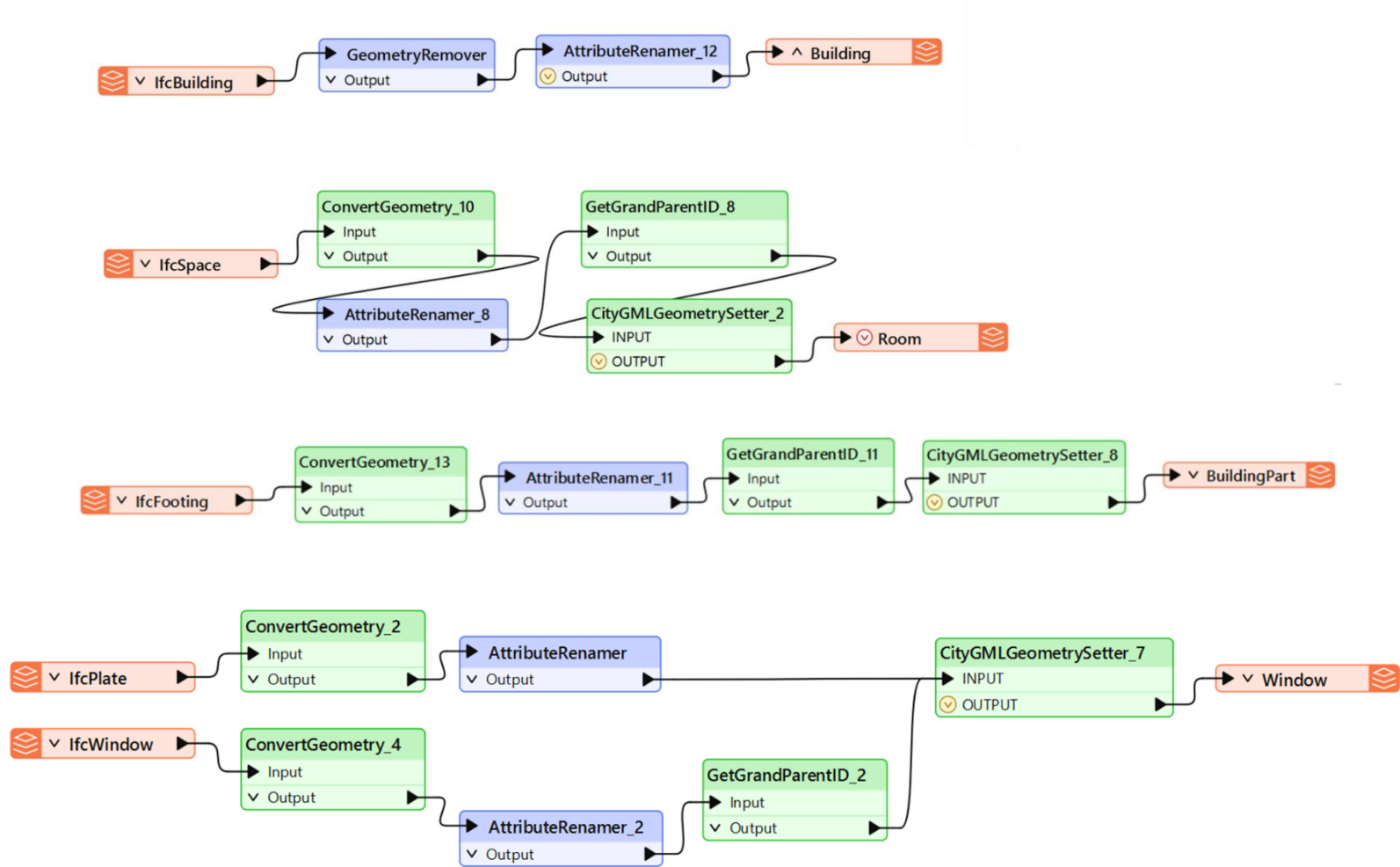
Şekil 7.9 CityGML BuildingPart Nesnesinin Oluşturulması



Sürecin sonunda, *CityGMLGeometrySetter* yardımıyla LoD seviyesi *LoD4MultiSurface* olarak atanmış, yapısal rolü ise *consistsOfBuildingPart* şeklinde tanımlanmıştır. Böylelikle *IfcFooting* nesnesi, CityGML'de *BuildingPart* sınıfı altında uygun detay seviyesi ve bağlamsal ilişkilendirmeyle birlikte modellenmiştir.

Şekil 7.10'da buraya kadar anlatılan IFC sınıflarının, CityGML'e dönüşümleri sırasında FME üzerinden uygulanan iş akışları bir arada gösterilmiştir.

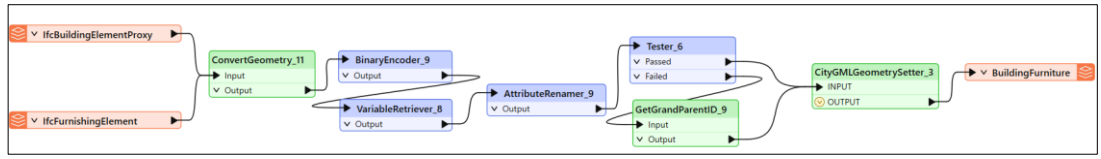
Şekil 7.10 FME Workbench Ortamında IFC Sınıflarının CityGML Nesnelere Dönüştürülmesine Yönelik İş Akışı-1



7.2.5 BuildingFurniture Nesnesinin Oluşturulması

Şekil 7.11'deki akış şeması, IFC formatındaki mobilya bileşenlerinin CityGML'deki *BuildingFurniture* sınıfına dönüştürülmesini göstermektedir. Kaynak veriyi oluşturan *IfcBuildingElementProxy* ve *IfcFurnishingElement* nesneleri, ilk olarak *ConvertGeometry* adımıyla CityGML'deki basitleştirilmiş yüzey temsillerine dönüştürülür. Nesnelerin üç boyutlu geometrilerinin LoD4 seviyesinde doğru şekilde

Şekil 7.11 CityGML BuildingFurniture Nesnesinin Oluşturulması



Sonraki aşamada *BinaryEncoder* ve *VariableRetriever* bileşenleri kullanılarak her bir öğenin hangi üst nesneye (örneğin bir odaya) ait olduğu belirlenir ve *_parent_type* özneliği elde edilir. *Tester* bileşeni bu bilgiyi filtreleyerek yalnızca bir *IfcSpace* öğesine (oda) bağlı olanları ayırır. Böylece yapısal elemanlar ile iç mekân donatıları net biçimde ayrıştırılır.

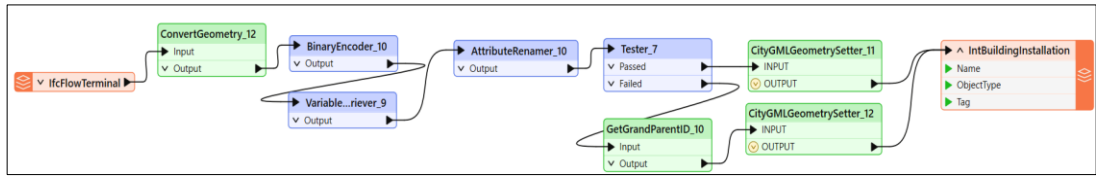
AttributeRenamer ile IFC'ye özgü *ifc_unique_id* ve *ifc_parent_unique_id* öznelikleri sırasıyla *gml_id* ve *gml_parent_id* olarak yeniden adlandırılır. Bu adım veri bütünlüğünü ve ilişkisel yapıyı koruma açısından kritik öneme sahiptir. Ardından *GetGrandParentID* bileşeni devreye girerek, yalnızca oda (*IfcSpace*) düzeyinde değil bir üst mekânsal sınıfı da (örneğin kat veya bina) belirler. Böylece mobilya nesnesi, oda ve yapı hiyerarşisi içinde doğru konuma yerleştirilir.

Sürecin sonunda *CityGMLGeometrySetter* ile nesnelere *LoD4Geometry* seviyesi atanır ve *interiorFurniture* rolü tanımlanır. Sonuçta *BuildingFurniture* nesnesi, geometrik, hiyerarşik ve semantik bakımdan CityGML standardına entegre edilmiş olur.

7.2.6 InteriorBuildingInstallation Nesnesinin Oluşturulması

Şekil 7.12’de gösterilen iş akışı, *IfcFlowTerminal* nesnelerinin CityGML formatına iç mekân donatıları (*InteriorBuildingInstallation*) olarak dönüştürülmesini hedeflemektedir. İlk adımda *ConvertGeometry_12* bileşeni kullanılarak IFC formatındaki karmaşık geometri sadeleştirilmiş yüzeylere (*simple surfaces*) dönüştürülür. Bu işlem CityGML’in desteklediği *MultiSurface* formatına geçiş için gereklidir.

Şekil 7.12 CityGML InteriorBuildingInstallation Nesnesinin Oluşturulması



Ardından *BinaryEncoder_10* ve *VariableRetriever_9* *Transformer*’ları devreye girerek nesnenin bağlı olduğu üst öğenin türü (örneğin *IfcSpace* mi yoksa *IfcWall* mı olduğu) belirlenir. *VariableRetriever* bileşeni, *_parent_id* değişkenini kullanarak üst nesne türünü *_parent_type* adlı yeni bir öznelik olarak atar.

Elde edilen tür bilgisi ile *AttributeRenamer_10*, *ifc_unique_id* ve *ifc_parent_unique_id* özneliklerini sırasıyla *gml_id* ve *gml_parent_id* olarak yeniden adlandırır. Adlandırmalar, CityGML’de nesne kimlik hiyerarşisinin korunması açısından önem taşır. Sonrasında *Tester_7* modülü, nesnenin ebeveyninin *IfcSpace* olup olmadığını kontrol eder. Eğer *IfcSpace* ise, nesne bir oda içi donatı olarak kabul edilir ve *CityGMLGeometrySetter_11* aracılığıyla *roomInstallation* rolüyle etiketlenir. Aksi durumda (örn. ebeveyn *IfcWall*) *GetGrandParentID_10* adımı ile bir üst kademeye çıkılır ve *CityGMLGeometrySetter_12* ile rolü *InteriorBuildingInstallation* olarak tanımlanır. Her iki durumda da LoD seviyesi *LoD4Geometry* olarak atanır ve yüksek detaylı geometrik temsil sağlanır.

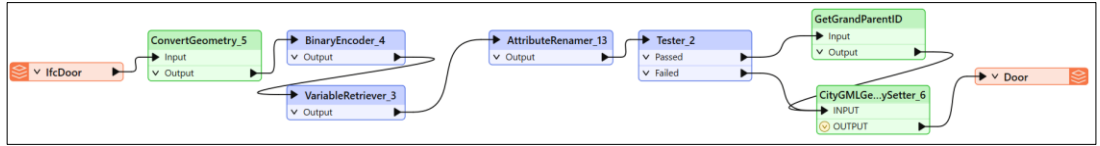
İş akışı sayesinde, lavabo gibi *IfcFlowTerminal* bileşenleri mekânsal bağlamı korunarak (örn. hangi odaya ait olduğu) CityGML veri modeline uygun biçimde doğru

rol ve detay seviyesiyle dışa aktarılır. Böylelikle bina içi donatılar, BIM’den CBS ortamına anlamlı ve eksiksiz bir şekilde aktarılmış olur.

7.2.7 Door Nesnesinin Oluşturulması

IfcDoor (kapı) nesnelerinin CityGML formatına dönüştürülme süreci FME Workbench üzerinde tanımlanan bir dizi dönüştürücü ile yürütülmüştür (Şekil 7.13). İlk adımda *ConvertGeometry_5* kullanılarak kapının geometrisi basit yüzey (*simple surface*) formatına çevrilmiştir. Ardından *BinaryEncoder_4*, kapının bağlı olduğu ebeveyn nesnenin kimliğini HEX formatına dönüştürerek *_parent_id* alanına atamıştır. Bu kimlik, *VariableRetriever_3* üzerinden çağrılarak *_parent_type* bilgisi elde edilmiştir.

Şekil 7.13 CityGML Door Nesnesinin Oluşturulması

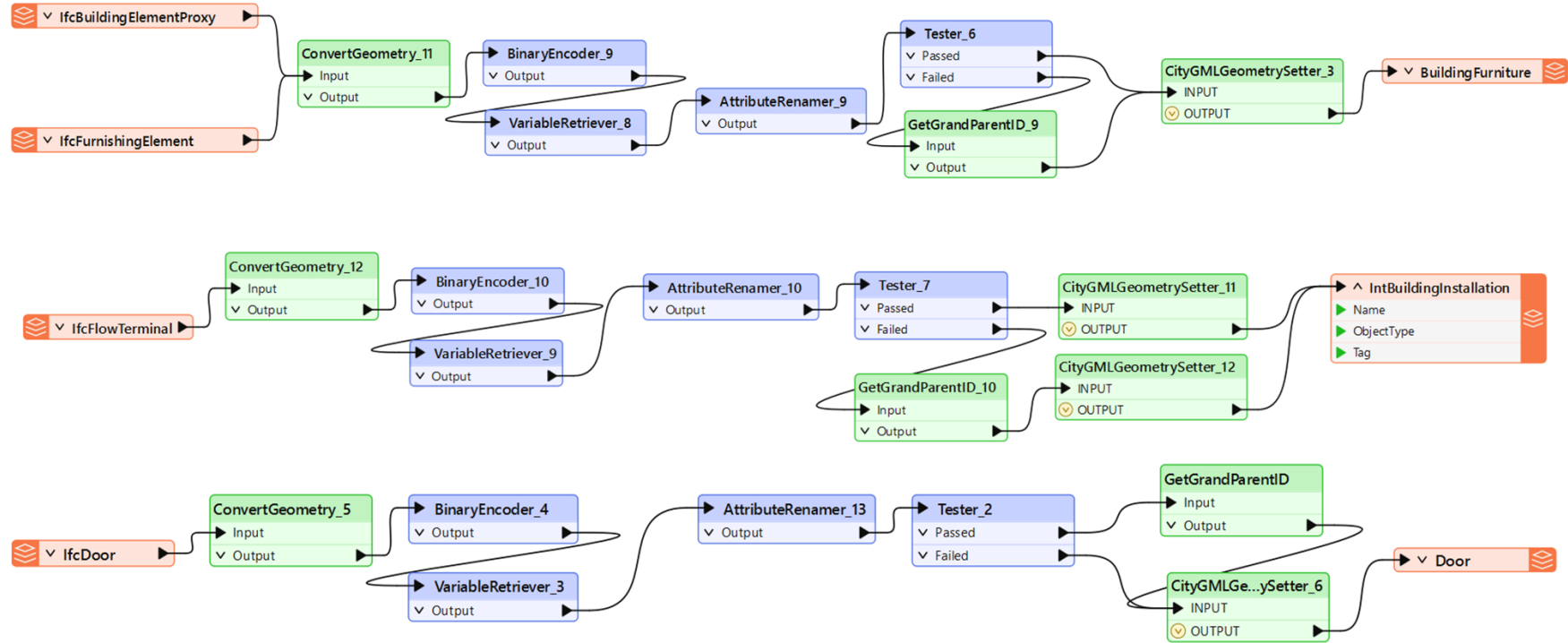


Ebeveyn türüne göre ayırım yapmak amacıyla *Tester_2* devreye girmiş ve yalnızca perde duvar (*IfcCurtainWall*) olmayan kapılar işleme alınmıştır. Kimliklerin yeniden adlandırılması ise *AttributeRenamer_13* ile gerçekleştirilmiş, IFC’deki *ifc_unique_id* ve *ifc_parent_unique_id* değerleri sırasıyla *gml_id* ve *gml_parent_id* olarak düzenlenmiştir. Daha üst seviyedeki hiyerarşik bağ (örn. kata aitlik) *GetGrandParentID* modülü ile kurulmuş ve bu bağlam *gml_parent_id* üzerinden tanımlanmıştır.

Sürecin sonunda *CityGMLGeometrySetter_6* aracılığıyla her kapıya LOD4 detay seviyesi ve *opening* rolü atanmıştır. Böylece kapı nesneleri geometrik açıdan detaylı biçimde temsil edilmiş ve bina modeli içindeki konumsal ve hiyerarşik bağlamı korunarak CityGML’in *Door* sınıfı altında doğru şekilde modellenmiştir.

IfcBuildingElementProxy, *IfcFurnishingElement*, *IFCFlowTerminal* ve *IfcDoor* sınıflarının dönüşüm işlemlerini gösteren FME iş akış şeması Şekil 7.14’te gösterilmiştir.

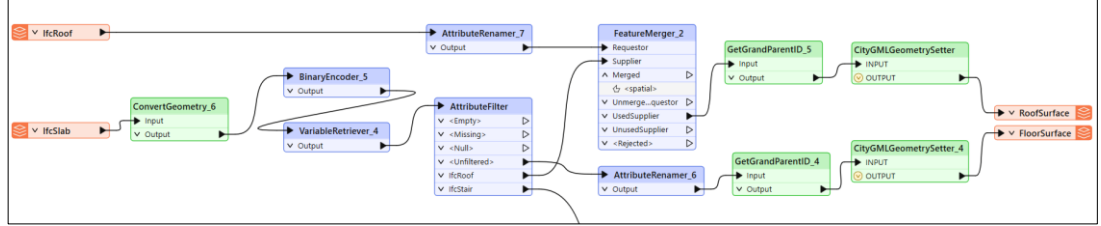
Şekil 7.14 FME Workbench Ortamında IFC Sınıflarının CityGML Nesnelere Dönüştürülmesine Yönelik İş Akışı-2



7.2.8 FloorSurface ve RoofSurface Nesnelerinin Oluşturulması

Genel amaç, IFC'den gelen çatı (*IfcRoof*) ve döşeme/zemin (*IfcSlab*) geometrilerini CityGML formatında LoD4 düzeyinde *RoofSurface* ve *FloorSurface* objelerine dönüştürmektir.

Şekil 7.15 CityGML'de FloorSurface ve RoofSurface Nesnelerinin Oluşturulması



İlk adımda *AttributeRenamer_7* dönüştürücüsü kullanılarak *ifc_unique_id* özniteliği *gml_id* olarak yeniden adlandırılır ve CityGML yapısıyla uyumlu bir kimlik oluşturulur. Ardından *FeatureMerger_2*, CityGML'de çatı yüzeyini temsil eden *RoofSurface* öğelerini, ebeveyn özniteliği olan *ifc_parent_unique_id* üzerinden birleştirerek *IfcSlab* gibi alt bileşenlerle mekânsal olarak eşleştirir. Bu eşleştirme, *gml_id* ile *ifc_parent_unique_id* arasındaki ilişki sayesinde gerçekleştirilir.

Sonraki aşamada *GetGrandParentID_5* kullanılarak çatının üst soy bilgisi (örn. bina veya kat gibi daha üst yapılar) *gml_parent_id* olarak atanır. Böylece nesnenin bağlamsal konumu CityGML içinde korunmuş olur. Sürecin sonunda *CityGMLGeometrySetter* dönüştürücüsü devreye girerek çatı yüzeyleri *LOD4MultiSurface* geometrik düzeyinde tanımlanır ve *boundedBy* rolüyle sınıflandırılır.

ConvertGeometry Transformer_6'ı kullanarak *IfcSlab* geometrisi uygun bir yüzey biçimine dönüştürülür ve üst yapıyla ilişkilendirilmeye hazır hâle getirilir. *BinaryEncoder Transformer_1*, *IfcSlab*'ın *ifc_parent_unique_id* değerini HEX formatında *_parent_id* adlı yeni bir öznitelik olarak kodlar. Ardından *VariableRetriever Transformer_1* yardımıyla bu *_parent_id* değişkeni kullanılarak *IfcSlab* öğesinin hangi üst türle ilişkili olduğu belirlenir. Elde edilen bilgi *_parent_type* alanına yazılır. *_parent_type* değeri *AttributeFilter* ile filtrelenir. Eğer *IfcSlab* bir

IfcRoof ögesine bağlıysa, *IfcRoof* alt bileşeni olarak değerlendirilir. Bu durumda *FeatureMerger Transformer*'ı ile *IfcSlab*'ın *ifc_parent_unique_id* değeri ile *IfcRoof* 'un *gml_id* değeri eşleştirilir. Ardından *GetGrandParentID Transformer*'ı çatının üst yapısını (örn. kat veya bina) belirleyerek *IfcSlab* ögesine *gml_parent_id* atar. Geometri tanımı *CityGMLGeometrySetter* ile yapılır ve *IfcSlab* ögesi *CityGML* içinde *boundedBy* rolüyle *RoofSurface* olarak modellenir.

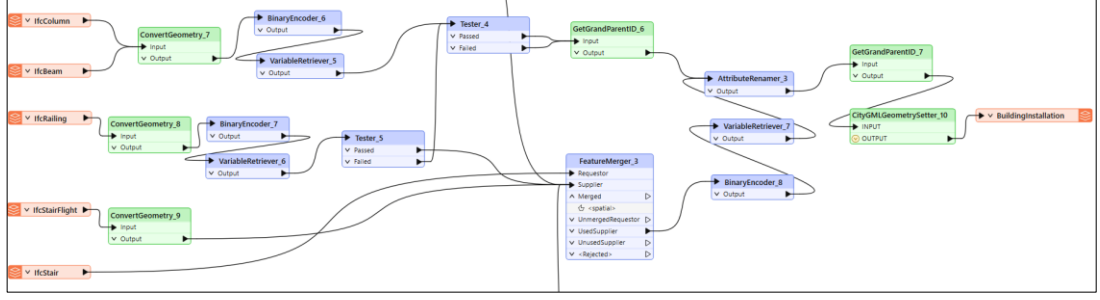
Filtreleme sonucunda “*Unfiltered*” kısmına düşen, yani herhangi bir çatı ya da merdiven gibi belirli bir üst türe bağlı olmayan, *IfcSlab* ögeleri ise bağımsız yapı bileşeni olarak değerlendirilir. Bu durumda *AttributeRenamer Transformer*'ı ile *ifc_unique_id* değeri *gml_id* olarak yeniden adlandırılır. Ardından *GetGrandParentID* ile üst yapı belirlenerek *gml_parent_id* atanır. Geometri tanımı yine *CityGMLGeometrySetter* ile yapılır ve *IfcSlab* ögesi *LoD4MultiSurface* formatında bağımsız bir *FloorSurface* olarak *CityGML* yapısına eklenir.

7.2.9 BuildingInstallation Sınıfının Oluşturulması

Şekil 7.16'da gösterilen iş akışı, *IfcColumn*, *IfcBeam*, *IfcRailing*, *IfcStairFlight* ve *IfcStair* bileşenlerini *CityGML*'de *BuildingInstallation* nesnesine uygun şekilde hiyerarşik olarak yapılandırmak amacıyla tasarlanmıştır. Süreç geometrinin sadeleştirilmesi, üst soy bilgileriyle hiyerarşik bağlamın kurulması ve uygun rol atamasını içermektedir.

İlk adımda *IfcColumn* ve *IfcBeam* nesneleri *ConvertGeometry_7 Transformer*'ı aracılığıyla *CityGML*'de kullanılabilir bir yüzey temsiline dönüştürülür. Sonrasında bu nesnelerin ebeveyn türleri belirlenir. *BinaryEncoder_6*, *ifc_parent_unique_id* bilgisini HEX formatına çevirerek *_parent_id* alanına atar. *VariableRetriever_5* ise bu kimliğe karşılık gelen *_parent_type* bilgisini elde eder. Böylece yapı elemanının bir montaj grubu parçası olup olmadığı kontrol edilebilir hâle gelir.

Şekil 7.16 CityGML BuildingInstallation Nesnesinin Oluşturulması



Tester_4 kullanılarak *_parent_type* değeri *IfcElementAssembly* olan nesneler filtrelendir ve yalnızca bir montaj grubuna ait kolon ve kirişler bir sonraki adıma geçer. Bu aşamada doğrudan ebeveyn ve büyük ebeveyn ilişkileri belirlenir. Öncelikle *GetGrandParentID_6* ile *ifc_parent_unique_id* üzerinden *gml_parent_id* atanır. Ardından *AttributeRenamer_3* ile *ifc_unique_id* değeri *gml_id* olarak yeniden adlandırılır. Böylece CityGML yapısında kullanılacak benzersiz kimlik atanmış olur.

Hiyerarşik bütünlüğün tamamlanması için *GetGrandParentID_7 Transformer*'ı devreye girerek, önceki adımda atanan *gml_parent_id* daha üst düzey ebeveyne bağlanacak şekilde yeniden işlenir. Son aşamada *CityGMLGeometrySetter_10* kullanılarak geometri LoD4 seviyesinde tanımlanır ve *interiorBuildingInstallation* rolü atanır. Böylece *IfcColumn* ve *IfcBeam* bileşenleri, iç mekân bina elemanı olarak CityGML standardına uygun biçimde dışa aktarılmış olur.

Şekil 7.16'da devam eden iş akışı, merdiven elemanlarıyla ilişkili korkulukların (*IfcRailing*) ayrıştırılması ve doğru geometrik ilişkilerle *IfcStair* nesnesine entegre edilmesini hedeflemektedir. Süreçte üç temel IFC sınıfı birlikte işlenmektedir.

İlk aşamada *IfcRailing* nesneleri *ConvertGeometry_8* üzerinden sadeleştirilmiş yüzey geometrisine dönüştürülür. Ardından *BinaryEncoder_7* ile korkuluğun ebeveynine ait *ifc_parent_unique_id* değeri HEX kodlu *_parent_id* değişkenine çevrilir. Bu kimlik, *VariableRetriever_6* aracılığıyla kullanılarak *_parent_type* bilgisi elde edilir. Böylece korkuluğun bir merdivene mi yoksa doğrudan binaya mı ait olduğu ayırt edilir.

Tester_5 bu ayrımı yaparak *_parent_type = IfcStairFlight* olan korkulukları belirler. Seçilen bu elemanlar *FeatureMerger_3 Transformer*'ına *supplier* (sağlayıcı) olarak gönderilir. Aynı zamanda *IfcStairFlight* nesneleri *ConvertGeometry_9* ile geometrik olarak işlenir ve *FeatureMerger_3*'ün *requestor* (istekçi) girişine yönlendirilir. Sonuçta, korkuluklar ilgili merdiven basamaklarıyla *attribute* tabanlı (kimlik eşleştirmesi) yöntemle ilişkilendirilir.

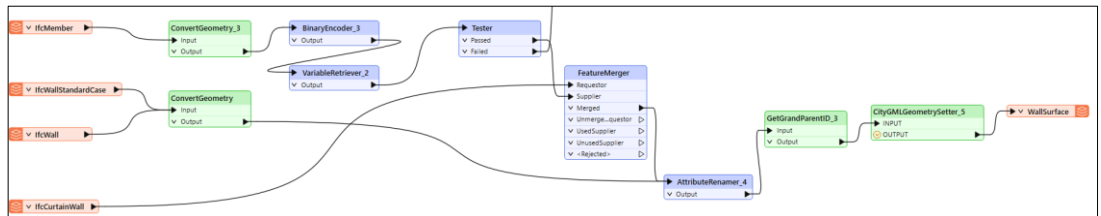
FeatureMerger_3'ün *UsedSupplier* çıkışı, eşleştirilen korkulukları ifade eder ve bu çıkıştan çıkan elemanlar sonrasında *IfcStair* nesneleri ile eşleştirilir. Bunun için *IfcStair* bileşenleri de doğrudan *FeatureMerger_3*'ün *requestor* girişine bağlanır. Böylece merdiven basamakları ile eşleşmiş korkuluklar üst düzey *IfcStair* nesnesine bağlanmış olur.

Eşleştirilen tüm bileşenler bu noktada *BinaryEncoder_8* ile *_parent_id* olarak kodlanır, *VariableRetriever_7* ile *_parent_type* bilgisi elde edilerek hiyerarşi doğrulanır. Sonuç olarak korkuluklar (*IfcRailing*), önce ait oldukları *IfcStairFlight* ile ardından genel *IfcStair* ile doğru şekilde ilişkilendirilmiş olur.

7.2.10 WallSurface Nesnesinin Oluşturulması

IfcMember, *IfcWallStandardCase*, *IfcWall* ve *IfcCurtainWall* nesneleri, duvarlara ait farklı bileşenleri temsil etmektedir. *IfcWallStandardCase* tipik düz duvarları, *IfcCurtainWall* perde duvar sistemlerini, *IfcMember* ise genellikle yapısal destek elemanlarını (ör. kiriş altı profiller veya duvar içi destekler) ifade eder. BIM modelinde farklı IFC sınıfları altında tanımlansalar da CityGML'e aktarılırken ortak bir semantik çatı olan *WallSurface* sınıfında birleştirilirler (Şekil 7.17).

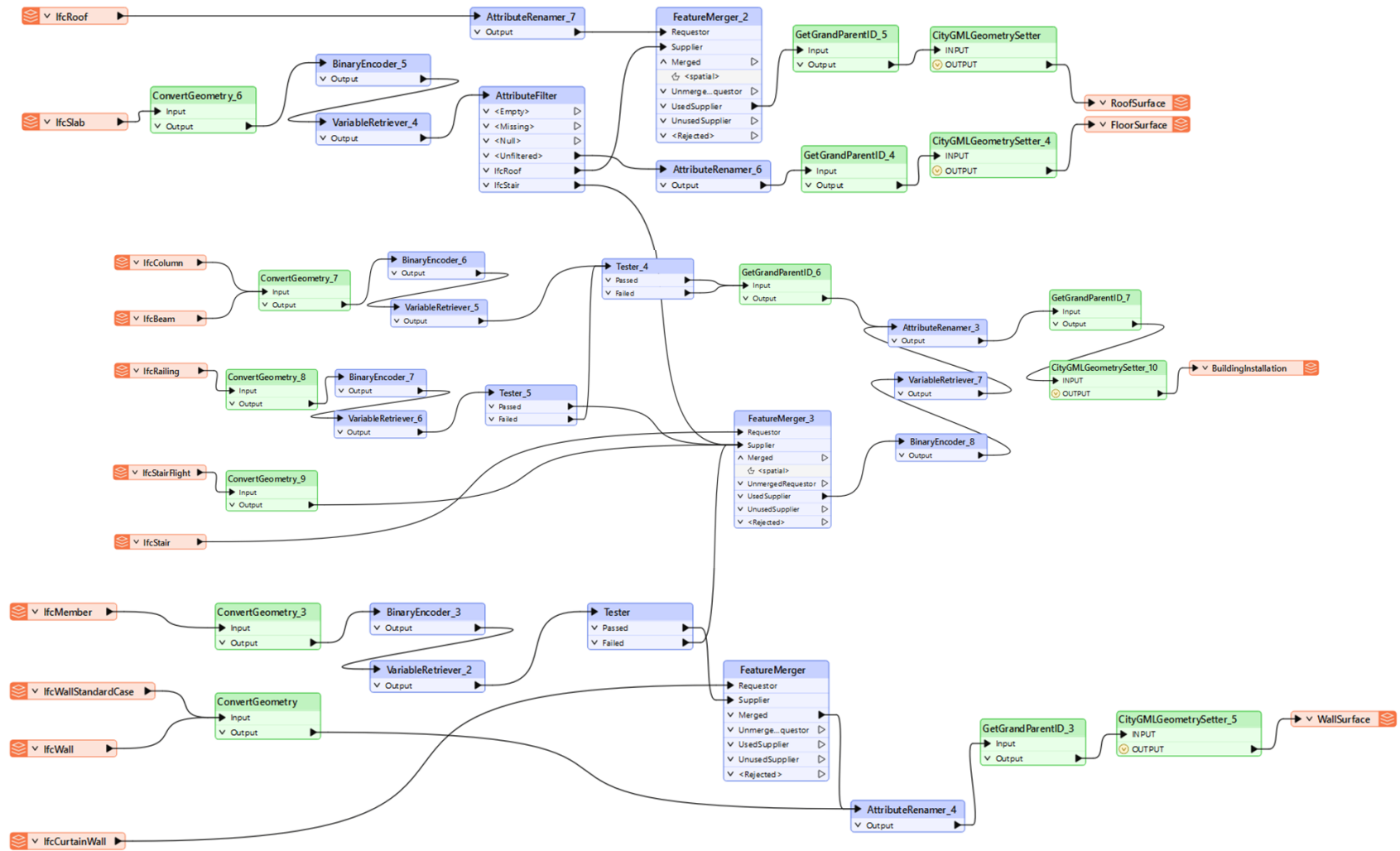
Şekil 7.17 CityGML WallSurface Nesnesinin Oluşturulması



IfcMember ögeleri, farklı yapısal bağlamlarda yer alabildikleri için özel bir ayrıştırma işleminden geçer. *ConvertGeometry* ile yüzey geometrisine dönüştürülen ögelerin *ifc_parent_unique_id* değeri *BinaryEncoder_3* ile kodlanır, *VariableRetriever_2* ile buna karşılık gelen *_parent_type* bilgisi alınır. *Tester*, nesnenin *IfcCurtainWall*'a mı yoksa *IfcStair* gibi başka bir yapıya mı bağlı olduğunu kontrol eder. *Tester*'in *Passed* çıkışındaki *IfcMember*'lar *FeatureMerger*'a *supplier* olarak gönderilerek ilgili üst öğeyle (*IfcCurtainWall*, *IfcWall*, *IfcWallStandardCase* — *requestor*) birleştirilir. Böylelikle perde duvarlar ve duvarlar, kendi profilleri ile kirişleri bütünlük tek bir geometriye dönüşür. *Failed* çıkışındaki ögeler *FeatureMerger_3* üzerinden alternatif işleme yönlendirilir. Sonraki adımlarda *AttributeRenamer_4* ile CityGML uyumlu kimlikler atanır, *GetGrandParentID_3* ile üst katman bilgisi eklenir ve *CityGMLGeometrySetter_5* ile LoD ile rol bilgisi tanımlanarak çıktı *WallSurface* sınıfına aktarılır. Yöntem, IFC'deki geometrik bağımlılıkların doğru semantik bağlamda ayrıştırılmasını ve CityGML'de yalnızca aynı yapısal bütünlüğe sahip ögelerin bir arada temsil edilmesini sağlar.

Şekil 7.18 'de görüldüğü üzere çatı, döşeme, kolon, kiriş, korkuluk, merdiven gibi ögelerin her biri uygun semantik sınıflara (ör. *RoofSurface*, *FloorSurface*, *BuildingInstallation*, *WallSurface*) aktarılmaktadır. Sürecin bir bütün olarak görülmesi için anlatılan aşamalardaki işlemlerin kalan kısmı birleştirilerek gösterilmektedir.

Şekil 7.18 FME Workbench Ortamında IFC Sınıfların CityGML Sınıflarına Dönüştürülmesine Yönelik İş Akışı-3

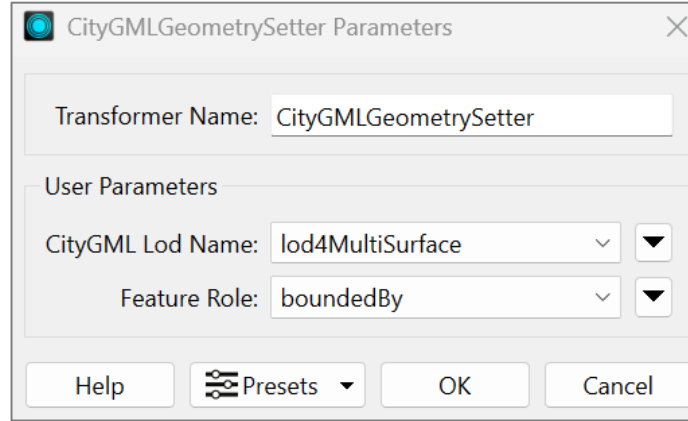


7.3 İşlem Adımlarında Kullanılan Transformer Bileşenleri

7.3.1 CityGMLGeometrySetter

CityGML *Geometry Setter Transformer*'ı, IFC elemanlarını uygun CityGML nesnelere dönüştürürken her öğeye “*Feature Role*” parametresiyle rol atar. Örneğin *IfcWall* elemanları *boundedBy*, *IfcChair* gibi mobilyalar ise *interiorFurniture* rolünde tanımlanır. Yüzey tabanlı öğeler için *LoD4MultiSurface*, hacim tabanlı olanlar için *LoD4Geometry* seçilir. IFC'nin karmaşık geometrileri bu adımda CityGML'in daha sade modellerine uyarlanır ve elemanlar doğru geometrik ve semantik yapıyla sisteme entegre edilir.

Şekil 7.19 CityGMLGeometrySetter Transformer'ın FME'deki Görünümü



Parametreler:

- **CityGML LOD Name:** CityGML’de kullanılacak geometri tipini tanımlar. LoD4, en yüksek detay seviyesidir ve iç mekân bileşenlerini de kapsar.

-LoD4MultiSurface: Elemanın yüzey (*surface*) temsiliyle modellenmesini sağlar. Genellikle yapı elemanının dış veya iç sınırlarını oluşturan yüzeylerin detaylı şekilde tanımlanmasında kullanılır. Örneğin, *IfcWall*, *IfcWindow*, *IfcSlab* gibi elemanların dış geometri yüzeyleri LoD4’te detaylı yüzey modeli olarak aktarılır. Mekân sınırı tanımlayan (duvar, kapı, pencere vb.) elemanlarda *LoD4MultiSurface* kullanılır.

-LoD4Geometry: Elemanın üç boyutlu hacimsel geometrisini (*solid* veya *detailed body*) tanımlar. Daha çok yapının içindeki hacimsel, teknik ve donanımsal bileşenlerde kullanılır (örneğin *IfcBeam*, *IfcRailing*, *IfcFurniture*). Eğer eleman bir hacimsel nesne olarak iç mekânda yer alıyorsa (mobilya, kolon, tesisat elemanı), *LoD4Geometry* kullanılır.

- **Feature Role:** Geometrinin CityGML hiyerarşisindeki rolünü belirtir.

-interiorRoom: *IfcBuilding* ve *IfcSpace* gibi elemanlar için kullanılır. CityGML'deki "Room" nesnesini temsil eder. İç mekânın hacmini, sınırlarını ve geometrisini belirlemek için kullanılır.

-consistsOfBuildingPart: *IfcFooting* gibi yapı elemanlarının bina parçası (*BuildingPart*) olarak tanımlandığı durumlarda kullanılır. Yapının temelini oluşturan parçalar gibi, yapının alt bileşenlerini belirtir.

-opening: *IfcWindow*, *IfcDoor*, *IfcPlate* gibi yapı elemanları için kullanılır. Duvar veya diğer yüzeylerdeki açıklıklarını temsil eder. CityGML'de *boundedBy* ilişkisi içinde yer alırlar ve *Opening* sınıfına dönüştürülürler.

-roomInstallation: *IfcFlowTerminal* gibi sistem bileşenleri için kullanılır. Bir odanın içinde bulunan teknik donanımlar (örneğin havalandırma, ısıtma terminalleri) için kullanılır.

-interiorBuildingInstallation: Yapının iç mekânında yer alan ve yapısal veya teknik kurulumları temsil eden elemanlar için kullanılır (*IfcColumn*, *IfcBeam*, *IfcStair*, *IfcRailing* gibi). Mekân içi bileşenleri ifade eder.

-interiorFurniture: *IfcFurnishingElement* ve *IfcBuildingElementProxy* gibi nesneler için geçerlidir. İç mekândaki mobilyaları ve yerleşik donanımları belirtir.

-boundedBy: *IfcWall*, *IfcRoof*, *IfcSlab* gibi elemanların, mekânın fiziksel sınırlarını tanımladığı durumlarda kullanılır. Bir odanın (*Room*) *boundedBy* ilişkisini oluşturur.

Tablo 7.2, dönüşüm sırasındaki tüm CityGML *Lod Name* ve *Feature Role* için kullanılan uygun nitelikler gösterilmiştir.

Tablo 7.2 IFC Nesnelerinin Lod ve İşlevsel Değerleri

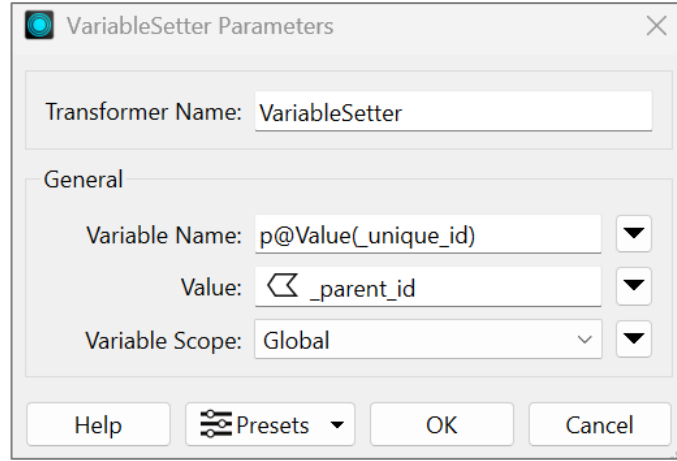
IFC Nesne Adı	CityGML LoD Name	Feature Role
IfcBuilding	LoD4MultiSurface	interiorRoom
IfcSpace	LoD4MultiSurface	interiorRoom
IfcFooting	LoD4MultiSurface	consistsOfBuildingPart
IfcPlate	LoD4MultiSurface	opening
IfcWindow	LoD4MultiSurface	opening
IfcFlowTerminal	LoD4Geometry	roomInstallation interiorBuildingInstallation
IfcBuildingElementProxy	LoD4Geometry	interiorFurniture
Ifc Furnishing Element	LoD4Geometry	interiorFurniture
IfcDoor	LoD4MultiSurface	opening
IfcRoof	LoD4MultiSurface	boundedBy
IfcSlab	LoD4MultiSurface	boundedBy
IfcColumn	LoD4Geometry	interiorBuildingInstallation
IfcBeam	LoD4Geometry	interiorBuildingInstallation
IfcRailing	LoD4Geometry	interiorBuildingInstallation
IfcStair	LoD4Geometry	interiorBuildingInstallation
IfcStairFlight	LoD4Geometry	interiorBuildingInstallation
IfcMember	LoD4MultiSurface	boundedBy
IfcWallStandardCase	LoD4MultiSurface	boundedBy
IfcWall	LoD4MultiSurface	boundedBy
IfcCurtainWall	LoD4MultiSurface	boundedBy

7.3.2 VariableSetter

VariableSetter Transformer'ı, IFC elemanlarının benzersiz kimliklerini (ID) ve bağlı oldukları üst elemanların kimliklerini (*parentID*) değişken olarak tanımlar (Şekil 7.20). IFC'deki hiyerarşik ilişkilerin CityGML'e doğru şekilde aktarılmasında kullanılır. Örneğin bir duvarın hangi kata ait olduğu ya da bir kapının hangi duvarda

bulunduğu bu değişkenler üzerinden belirlenebilir. CityGML tarafında ise bu ilişkiler *gml_parent_id* özniteliği ile ifade edilir.

Şekil 7.20 VariableSetter Transformer FME Görünümü



Parametreler:

- **Variable Name:** Değişken adı, genellikle *p@Value(_unique_id)* formatında, yani bir elemanın benzersiz kimliğine göre değişken adı oluşturur.

- **Value:** Değişken değeri, genellikle *_parent_id* formatında, yani bir elemanın üst elemanının kimliğini değişken değeri olarak atar.

- **Variable Scope:** Değişkenin kapsamını belirtir. Global ya da yerel bileşen seçilebilir. Global değişkenlere tüm iş akışında erişilebilir.

Kullanılan Öznitelikler:

- **unique_id :** Elemanın benzersiz kimliği, genellikle IFC'deki *GlobalId*'den türetilir.

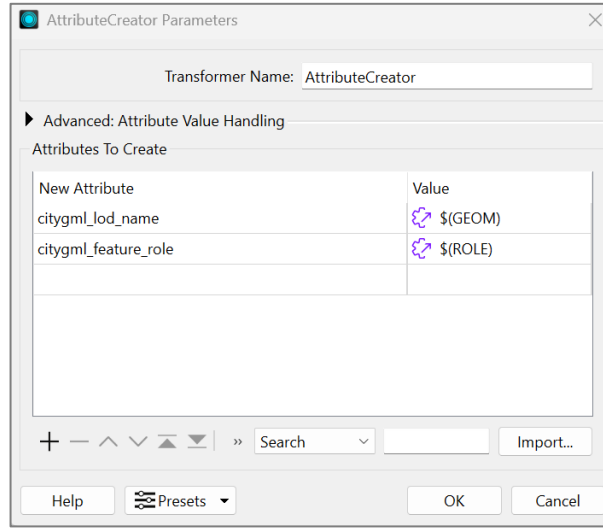
- **parent_id :** Elemanın üst elemanının kimliği.

Diğer tüm IFC öznitelikleri (*GlobalId*, *Name*, *Description*, vb.) değişkenlere atanabilir.

7.3.3 AttributeCreator

AttributeCreator, IFC özniteliklerini CityGML özniteliklerine dönüştürmek veya yeni öznitelikler eklemek için kullanılır (Şekil 7.21). Örneğin, IFC'deki *GlobalId*'yi CityGML'deki *gml_id*'ye dönüştürmek veya CityGML'de gerekli olan *citygml_LoD_name* gibi öznitelikleri eklemek için kullanılır.

Şekil 7.21 AttributeCreator Transformer FME Görünümü



Parametreleri:

-citygml_LoD_name: İlgili nesne geometrinin CityGML formatında hangi LoD düzeyinde tanımlanacağını belirler. Burada *\$(GEOM)*, başka bir Transformer veya kaynak tablodan gelen değerle eşleştirilmiştir. Örneğin "*LoD4MultiSurface*" ya da "*LoD4Geometry*" gibi değerler atanabilir.

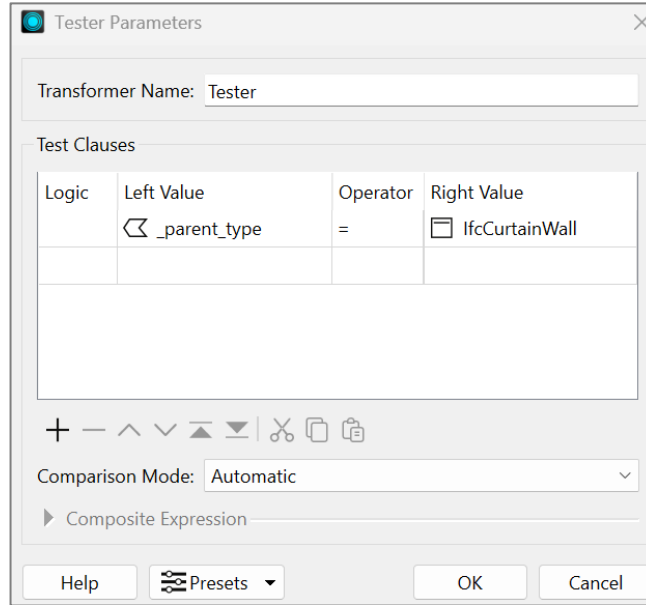
-citygml_feature_role: İlgili nesnenin CityGML içindeki fonksiyonunu tanımlar. Örneğin, *boundedBy*, *opening*, *interiorFurniture* gibi değerler alabilir. Bu değerler de muhtemelen bir *AttributeValueMapper* ya da *LookupTable* yardımıyla IFC türüne göre eşlenmiştir.

7.3.4 Tester

Tester Transformer'ı, belirli koşullara göre öğeleri filtreleyerek uygun CityGML sınıflarına yönlendirmek için kullanılır. Şekil 7.22'deki *Tester*, *_parent_type* değeri *IfcCurtainWall* olan öğeleri filtreleyerek *IfcMember* nesneleri

arasından yalnızca perde duvarlara ait olanları seçer. *IfcMember* farklı yapılarda (merdiven, giriş vb.) da kullanılabildiği için bu kontrol, *FeatureMerger* ile doğru geometrik eşleşmenin yapılması açısından önemlidir (Şekil 7.22).

Şekil 7.22 Tester Transformer FME Görünümü



Parametreler:

-Left Value: Test edilecek değer veya ifadeyi gösterir.

-Right Value: Operatör tarafından istenmesi halinde karşılaştırma değerini gösterir.

7.3.5 Attribute Filter

FME *AttributeFilter Transformer*'ı, verileri sahip oldukları öznitelik değerine göre gruplara ayırır (Şekil 7.23).

Parametreler:

-Attribute to Filter by: Hangi öznitelige göre filtreleme yapılacağını belirtir. Şekil 7.24'te “_parent_type” değeri seçilmiştir.

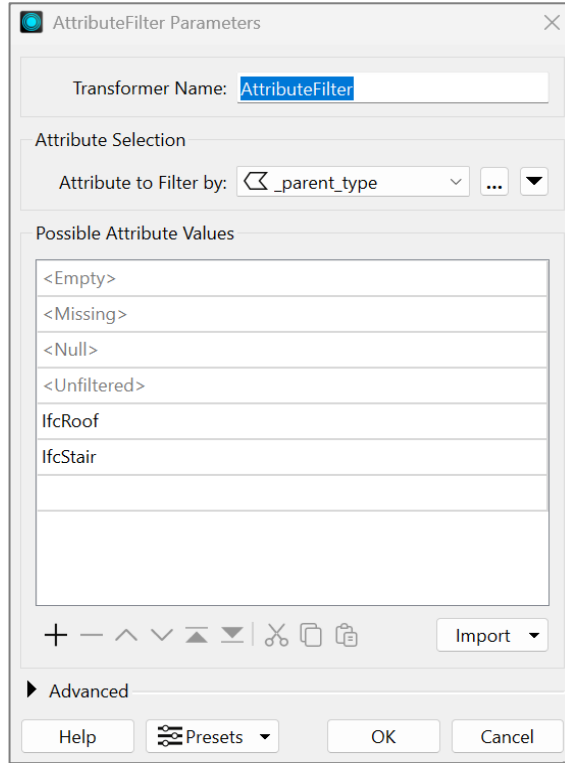
-Possible Attribute Values: Seçilen özneliğin alabileceği farklı değerleri gösterir. Örneğin *IfcRoof*, *IfcStair*.

Uygulamada, *IfcSlab* geometrisini *ConvertGeometry* ile dönüştürdükten sonra, *BinaryEncoder* ve *VariableRetriever* ile *_parent_type* bilgisi alınmış. Bu bilgi *AttributeFilter* ile ayrıştırılarak:

-Eğer *_parent_type* = *IfcRoof* → Bu geometri *Roof* olarak işleniyor.

-Eğer *_parent_type* = *IfcStair* → Bu geometri başka bir işlem hattına yönlendirilmiştir.

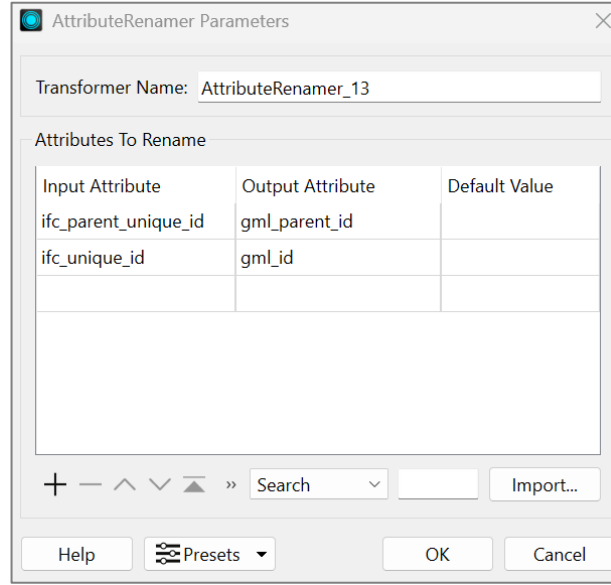
Şekil 7.23 Attribute Filter Transformer FME Görünümü



7.3.6 Attribute Renamer

AttributeRenamer, FME'de kullanılan bir dönüştürücüdür. Temel işlevi, mevcut bir *attribute*'un adını değiştirmektir. Değiştirilen *attribute*'ların değerleri korunur, sadece isimleri farklı bir adla değiştirilir.

Şekil 7.24 Attribute Renamer Transformer FME Görünümü

**Parametreler:**

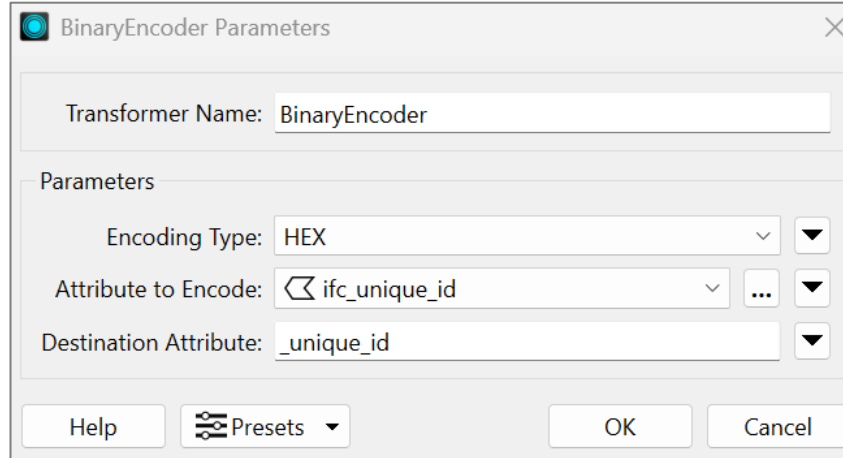
- **Input Attribute:** Yeniden adlandırmak istediğin mevcut *attribute* ismi.
- **Output Attribute:** Yeni verilecek *attribute* ismi.
- **Default Value:** Eğer *input attribute* mevcut değilse, buraya yazılan değer kullanılır (varsayılan değer).

Şekil 7.24’de, *ifc_unique_id* değeri IFC verisinden gelen benzersiz kimlik “*gml_id*” olarak; *ifc_parent_unique_id* ise IFC’deki üst öğeye ait kimlik “*gml_parent_id*” olarak yeniden adlandırılmıştır.

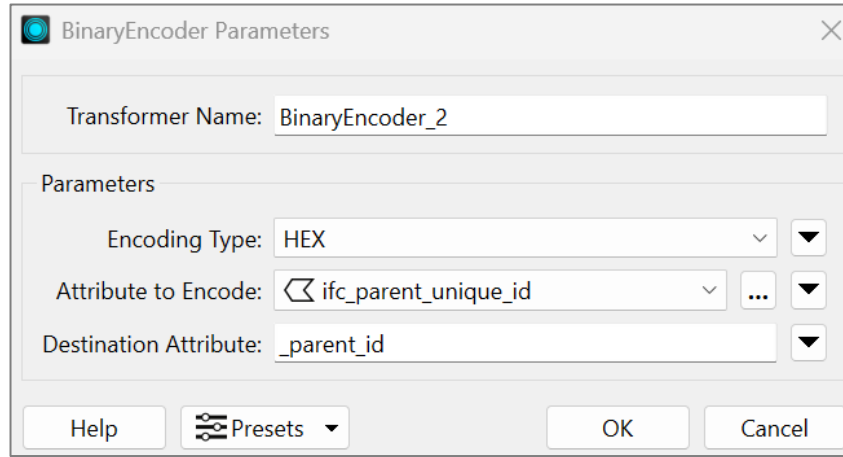
7.3.7 Binary Encoder

FME’deki bir transformatördür ve verileri metin olarak kodlamak için kullanılır (Şekil 7.25, Şekil 7.26). İkili (*binary*) verileri Base64 veya HEX formatında kodlayarak metin dosyalarına gömülebilir hale getirir. IFC’deki *GlobalId* gibi eşsiz tanımlayıcılar, HEX formatına çevrilip CityGML *gml:id* gibi alanlarda kullanılabilir.

Şekil 7.25 Binary Encoder Transformer FME Görünümü



Şekil 7.26 Binary Encoder_2 Transformer FME Görünümü



Parametreler:

-Encoding Type: Verinin hangi metin formatına dönüştürüleceği seçilir. İki seçenek vardır: HEX (onaltılık) veya Base64.

-Attribute to Encode: Kodlanacak olan mevcut *attribute* seçilir.

-Destination Attribute: Kodlanmış değer yazılacağı yeni *attribute* ismi.

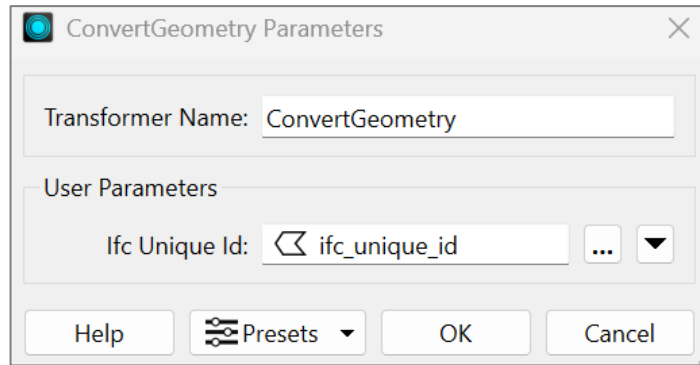
Uygulamaya ait görsellerde *ifc_unique_id attribute*'u HEX formatında kodlanarak *_unique_id attribute*'una yazılmıştır. *ifc_parent_unique_id attribute*'u ise yine HEX formatında kodlanarak *_parent_id attribute*'una yazılmıştır. Her iki

durumda da IFC'den gelen *GlobalId* gibi tanımlayıcılar, HEX formatına çevrilip CityGML'de geçerli olan metinsel *gml:id* ve *gml:parent_id* gibi alanlara dönüştürülmeye hazırlanmıştır.

7.3.8 Convert Geometry

IFC'deki karmaşık geometrileri CityGML'de kullanılabilecek daha basit geometri tiplerine dönüştürür (Şekil 7.27). Örneğin, yüzey (*Surface*) veya katılar (*solids*) gibi yapıları sadeleştirerek geometri uyumluluğu sağlar. CityGML formatına aktarımda LoD değerlerine uygun geometri tiplerinin oluşturulması gerekir. Örneğin; uygulamada *IfcPlate* ve *IfcWindow* gibi nesnelerin geometrisi, *ConvertGeometry* ile sadeleştirilerek CityGML uyumlu hale getirildi. Dönüştürülen geometri daha sonra diğer işlemlere (*gml:id* atama, *parent* ilişkisi kurma, vs.) gönderilmiştir.

Şekil 7.27 Convert Geometry Transformer FME Görünümü



Parametreler:

-Ifc Unique Id: Dönüştürülecek nesnenin IFC içerisindeki benzersiz kimliği.

7.3.9 Feature Merger

Bu *Transformer*'da *Requestor* ve *Supplier* verilerinin hangi *attribute* üzerinden eşleştirileceği belirtilir. Şekil 7.28'in 'b' kısmında, *ifc_unique_id* (*Requestor*) ile *ifc_parent_unique_id* (*Supplier*) eşleştiriliyor. Şekil 7.28 'a' kısmında ise *gml_id* (*Requestor*) ile *ifc_parent_unique_id* (*Supplier*) eşleştiriliyor. Bu sayede, hiyerarşik ilişkiler (ebeveyn-çocuk ilişkisi) üzerinden eşleme yapılabiliyor.

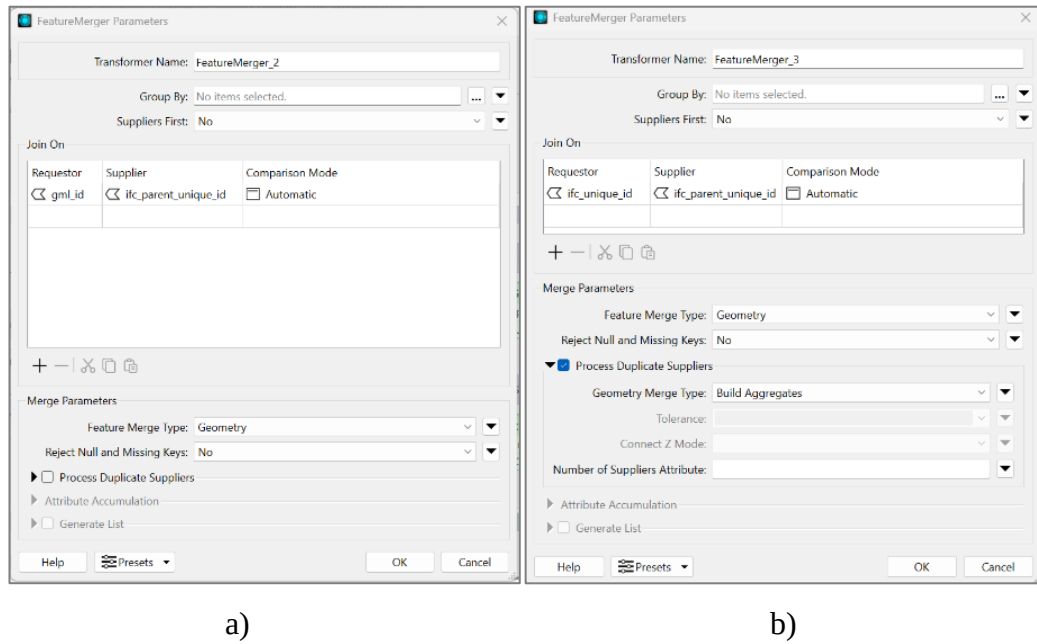
Parametreler:

-Feature Merge Type: *Geometry* seçilirse, sadece geometri birleştirilir.

-Geometry Merge Type: Sağ görselde *Build Aggregates* seçili. Bu, birden fazla geometriyi birleştirip toplu bir geometri (örneğin çoklu yüzey) oluşturur.

-Process Duplicate Suppliers: Açık olduğunda, bir *Requestor*'a birden fazla *Supplier* denk gelirse, bu *Supplier*'lardan gelen veriler işlenir.

Şekil 7.28 Feature Merger Transformer FME Görünümü



Uygulamaya ait olan görsellerde;

Sağ taraftaki *FeatureMerger_3* IFC'deki bir bileşenin (*child – ifc_unique_id*) kendi *parent* ögesiyle(*ifc_parent_unique_id*) olan geometrik ilişkisini kurarak elemanın ait olduğu üst ögeyle (örneğin bir kapının, odayla) geometrik olarak birleştirilmesini sağlar. *Build Aggregates* ile toplu bir geometri oluşturulmuştur.

Sol taraftaki *FeatureMerger_2*, CityGML tarafındaki bir objenin (*gml_id*) IFC verisindeki *parent* ile (*ifc_parent_unique_id*) eşleştirilmiştir. IFC verisinden alınan hiyerarşik bilgiyi, CityGML objesine yansıtmak için yapılmıştır.

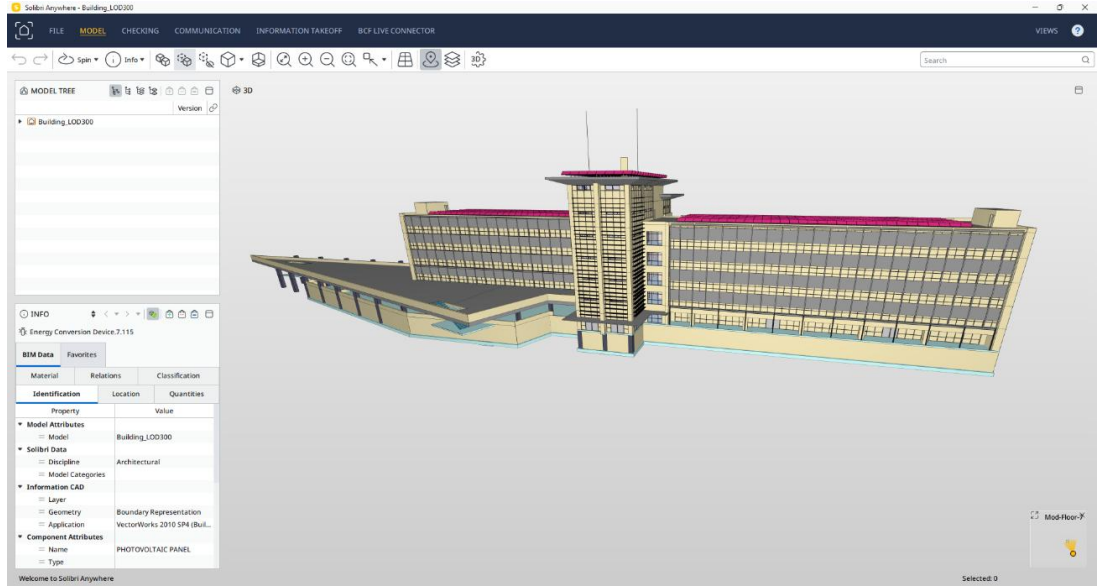
7.4 Dönüşüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Mimari ve Yapısal IFC modellerinin dönüşümü yapılmış olup ilgili dönüşümlerde FME üzerindeki aynı iş akışları kullanılmıştır. CityGML modellerinin gösteriminde KIT Model Viewer, IFC modellerinin gösteriminde ise Solibri Anywhere ve Autodesk Viewer tercih edilmiştir.

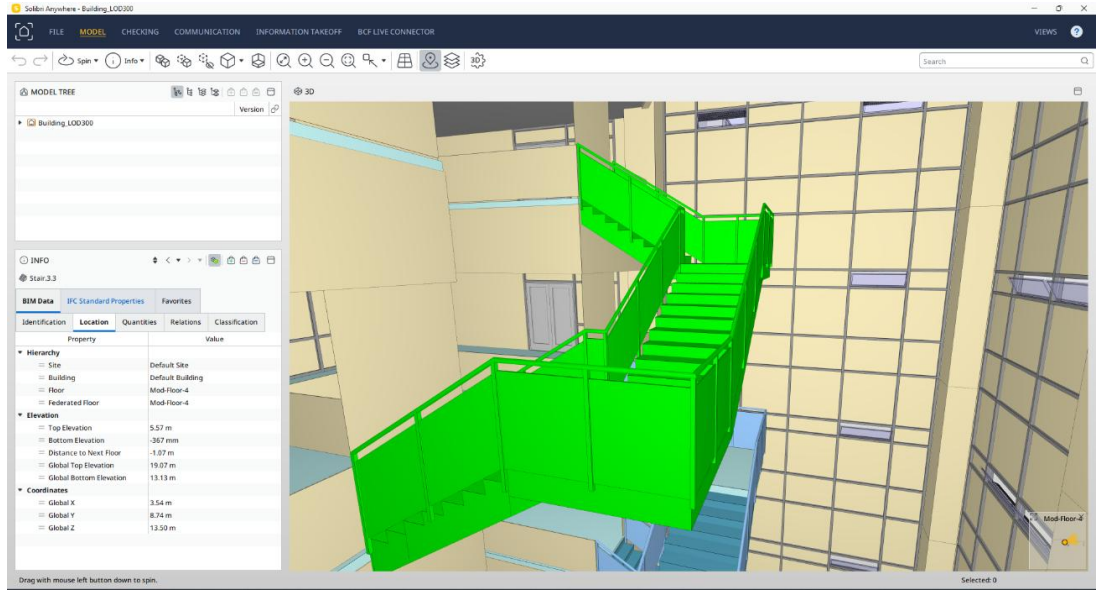
7.4.1 IFC Formatındaki Mimari Modelin CityGML'e Dönüşümü

IFC formatındaki Mimari modele ait görseller aşağıda gösterilmiştir (Şekil 7.29, Şekil 7.30)

Şekil 7.29 IFC Mimari Modelin Gösterimi

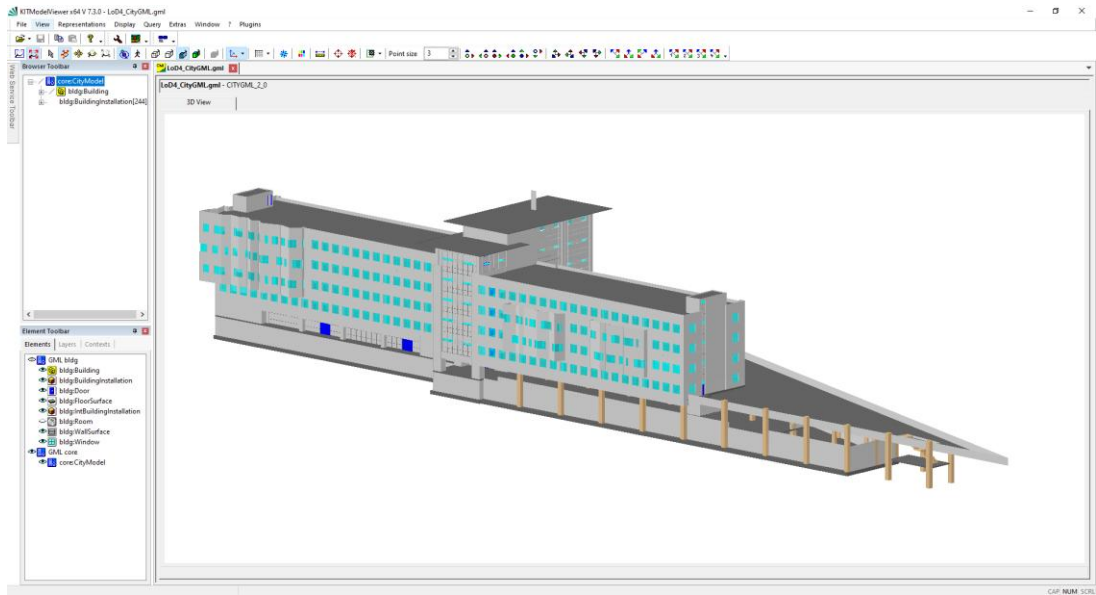


Şekil 7.30 Solibri Anywhere Yazılımı ile Bina Merdiven Detaylarının Gösterimi

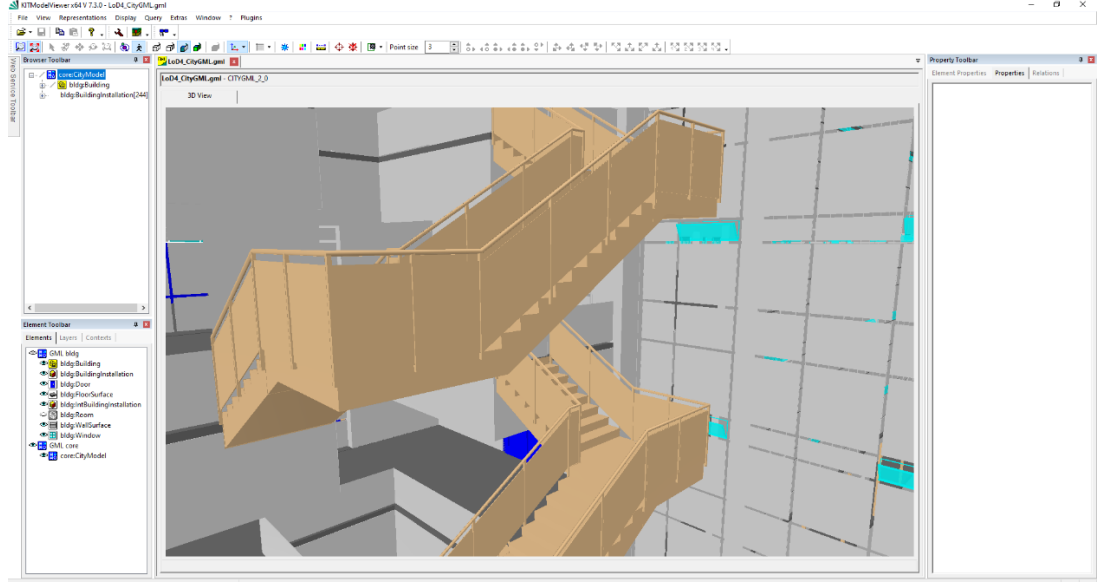


Mimari modelin dönüşümü sonucunda elde edilen CityGML modellerine ait görseller ise aşağıda sunulmuştur (Şekil 7.31, Şekil 7.32).

Şekil 7.31 Mimari Modelin CityGML Dönüşüm Sonucu



Şekil 7.32 CityGML Modelindeki Bina Merdiven Detayının Görünümü



Görsellerdeki IFC ve CityGML modelleri karşılaştırıldığında, dönüşüm sürecinin amaca uygun fakat belirli bilgi kayıplarıyla gerçekleştiği görülmektedir. IFC modeli, tasarım aşamasında kullanılan tüm detayları barındırdığı için merdiven basamakları, korkuluklar ve bağlantı elemanları gibi öğeleri ayrıntılı biçimde tanımlamakta ve mühendislik odaklı bir içerik sunmaktadır (Şekil 7.30). Buna karşılık CityGML modelinde geometri daha sade bir görünüme indirgenmiş, basamak ve korkuluk gibi detayları genelleştirmiştir (Şekil 7.32). Merdiven arkasındaki duvarlarda IFC’de görülen kaplama detayları aslında *IfcCovering* (kaplama, panel gibi yüzey elemanları) ya da *IfcOpeningElement* (açıklık tanımları) sınıflarına ait öğelerdir. CityGML dönüşümünde bu sınıfların çoğu karşılık bulmadığı veya sadeleştirme sırasında elendiği için, modelde yalnızca ana duvar yüzeyi kalmış ve bu kısımlar boşluk şeklinde görünmüştür (Şekil 7.32). Tüm bunlar aslında CityGML’in kentsel ölçekte görselleştirme ve CBS entegrasyonu için geliştirilmiş yapısıyla uyumludur. Semantik açıdan bakıldığında, IFC’de nesneler *IfcStair*, *IfcRailing* gibi ayrıntılı sınıflar altında tanımlanırken, CityGML tarafında bu bilgiler daha genel sınıflara dönüştürülmüş ve kısmen kaybolmuştur. Dolayısıyla dönüşümün temel çıktısı, IFC’nin mühendislik detaylarını koruyan zengin modelinden, CBS analizlerine uygun daha basitleştirilmiş bir modele geçiştir. Bu da IFC’den CityGML’e yapılan dönüşümlerde detay kaybının kaçınılmaz olduğunu ancak modelin tanınabilirliğini ve

CBS entegrasyonu için gerekli olan temel geometrik yapıyı başarıyla koruduğunu göstermektedir.

Tablo 7.3 Toplam Okunan IFC Nesne Sayılarını Gösteren Tablo

IFC Sınıfı	Sınıf İçindeki Nesne Sayısı
IfcBuildingElementProxy	73
IfcFlowTerminal	145
IfcColumn	126
IfcTypeObject	881
IfcSite	1
IfcOpeningElement	4473
IfcSpace	130
IfcCurtainWall	5
PropertySetDefinition	19
IfcSlab	85
IfcWindow	532
QuantitySetDefinition	1
IfcWallStandardCase	1746
IfcStair	25
IfcDoor	191
IfcRamp	2
IfcBuildingStorey	9
IfcTransportElement	2
IfcEnergyConversionDevice	464
IfcStairFlight	54
IfcMember	3796
IfcProject	1
IfcFlowFitting	22
IfcCovering	86
IfcBuilding	1
IfcRailing	35
Toplam	12905

Dönüşüm toplamda 7 dakika 42 saniye sürmüştür. Dönüşüm öncesindeki IFC modeli ile dönüşüm sonrası oluşan CityGML modelindeki nesneler ve sayıları tablo olarak sunulmuştur (Tablo 7.3 ve Tablo 7.4). Bu sayede dönüşüm sonrasında kaç nesnenin doğru şekilde eşleşip eşleşmediği karşılaştırılabilecektir. IFC modelleri daha öncesinde de bahsedildiği gibi hiyerarşik bir düzende tuttuğu nesneleri ve ilişkileri nedeniyle oldukça çok nesneye sahiptir. İçerdiği detay seviyesi LOD düzeyine göre değişse de düşük LOD seviyelerinde bile nesne sayısı azımsanamayacak düzeyde olmaktadır. Uygulamada LOD300 düzeyi kullanılmış ve CityGML LoD4 düzeyine eşleştirilmiştir.

Dönüşüm sürecinde, IFC formatında yer alan toplam 12.905 nesneden yalnızca 2.992'si CityGML modelinde anlamlı ve karşılığı bulunan sınıflara aktarılmıştır. Bu fark CityGML'de birebir karşılığı bulunmayan ya da yalnızca tanımlayıcı bilgi taşıyan sınıfların (örn. *IfcTypeObject*, *PropertySetDefinition*) filtrelenmesi ve bazı nesnelerin daha üst sınıflar altında birleştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Özellikle IFC'de 4.473 adet bulunan *IfcOpeningElement*, CityGML 2.0 yapısında bağımsız bir öge olarak yer almadığından kapı ve pencere gibi üst sınıflar içine entegre edilmiştir.

CityGML modelinde 1.746 adet *WallSurface* nesnesi, IFC tarafındaki *IfcWallStandardCase* ile birebir örtüşmektedir. *Window* (532) ve *Room* (130) gibi sınıflarda da sayıların tam eşleşmesi, bu nesnelerin veri kaybı olmadan aktarılabildiğini göstermektedir. Öte yandan *Door* sınıfı, IFC'deki *IfcDoor* sayısından biraz daha fazla görünmektedir. Burada *IfcOpeningElement* veya *IfcBuildingElementProxy* gibi sınıflardan da kapı nesneleri türetilmiş olabilir. *IfcTypeObject* (881), *PropertySetDefinition* (19), *QuantitySetDefinition* (1), *IfcProject* (1) sınıfları daha çok tanım bilgisi içerir dolayısıyla geometri üretmedikleri için CityGML'de görünmemiştir.

Tablo 7.4 Dönüşüm Sonrası CityGML Çıktı Nesne Sayılarını Gösteren Tablo

CityGML Sınıfı	Çıktı Veri Sayısı
Building	1
BuildingInstallation	146
CityModel	1
Door	244
FloorSurface	56
IntBuildingInstallation	136
Room	130
WallSurface	1746
Window	532
Toplam Çıktı Veri Sayısı	2992

Genel olarak, dönüşüm oranı yaklaşık %23 olup, IFC nesnelerinin yaklaşık dörtte biri CityGML tarafına aktarılmış (Şekil 7.35). Bu oran ilk bakışta düşük görünse de CityGML'nin yalnızca mekânsal ve semantik olarak anlamlı verileri barındıran yapısına uygun bir sonuçtur. Böylece çıktı model, gereksiz tanımlayıcı verilerden arındırılmış, daha sade ve CBS uygulamalarında kullanılmaya elverişli bir hale gelmiştir.

Uygulama sonucunda, yüksek ayrıntı seviyesine sahip bir IFC modelinin CityGML LoD4 yapısına dönüştürülmesi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Her bir dönüşüm adımı, CityGML'in semantik ve geometrik yapısına uygun şekilde modellenmiştir.

Tablo 7.5'de IFC sınıflarıyla eşleşen CityGML sınıflarının eşleştirilmesi gösterilmiştir. Dönüşüm işlemleri FME ortamında CityGML 2.0 şeması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FME'nin yalnızca CityGML 2.0 sürümünü desteklemesi nedeniyle, IFC'den elde edilen ayrıntılı nesneler daha sınırlı sayıda CityGML sınıfı altında toplanmıştır. Örneğin, IFC'de farklı türlerde tanımlanan duvar sistemleri (*IfcWall*, *IfcWallStandardCase*, *IfcCurtainWall*, *IfcMember*) CityGML'de tek bir sınıf olan *WallSurface* altında birleştirilmiştir. Benzer şekilde kolon, giriş, korkuluk ve merdiven gibi taşıyıcı veya ikincil yapısal öğeler *BuildingInstallation* sınıfı altında gruplanmıştır. İç mekânların hacimsel karşılığı olan *IfcSpace*, CityGML'de *Room*

nesnesine dönüştürülmüş, tesisat bağlantı noktalarını temsil eden *IfcFlowTerminal* ise *IntBuildingInstallation* sınıfına eşleştirilmiştir.

Tablo 7.5 IFC Sınıflarına Karşılık Gelen CityGML Sınıflarının Eşleşmesini Gösteren Tablo

CityGML Nesnesi	Eşleşen IFC Nesneleri (IFC 2x3)
Building	IfcBuilding
Room	IfcSpace
BuildingPart	IfcFooting
Window	IfcWindow, IfcPlate
Door	IfcDoor
IntBuildingInstallation	IfcFlowTerminal
BuildingFurniture	IfcBuildingElementProxy, IfcFurnishingElement
RoofSurface	IfcRoof, IfcSlab (çatıya bağlı olanlar)
FloorSurface	IfcSlab (bağımsız/“Unfiltered” olanlar)
WallSurface	IfcWall, IfcWallStandardCase, IfcCurtainWall, IfcMember
BuildingInstallation	IfcColumn, IfcBeam, IfcRailing, IfcStair, IfcStairFlight

Çatı ve döşeme elemanları özel bir ayrıştırma ile ele alınmış, çatıya bağlı *IfcSlab* nesneleri *RoofSurface* olarak, bağımsız konumda olanlar ise *FloorSurface* olarak işlenmiştir. *IfcFooting* elemanları temel seviyesindeki yapı bileşenlerini temsil ettiği için *BuildingPart* sınıfına aktarılmış, donatı ve hareketli elemanlar (*IfcBuildingElementProxy* ve *IfcFurnishingElement*) *BuildingFurniture* sınıfına dönüştürülmüştür. Eşleştirmeler IFC’nin ayrıntılı BIM tabanlı veri yapısının CityGML’in kentsel ölçekli semantik şemasıyla uyumlandırılmasını sağlayarak, her iki veri modelinin birlikte çalışabilirliğine zemin hazırlamıştır. CityGML 3.0 desteğinin FME’ye entegre edilmesi halinde daha kapsamlı bir dönüşüm mümkün olacaktır.

7.4.2 IFC Formatındaki Yapısal Modelin CityGML Formatına Dönüşümü

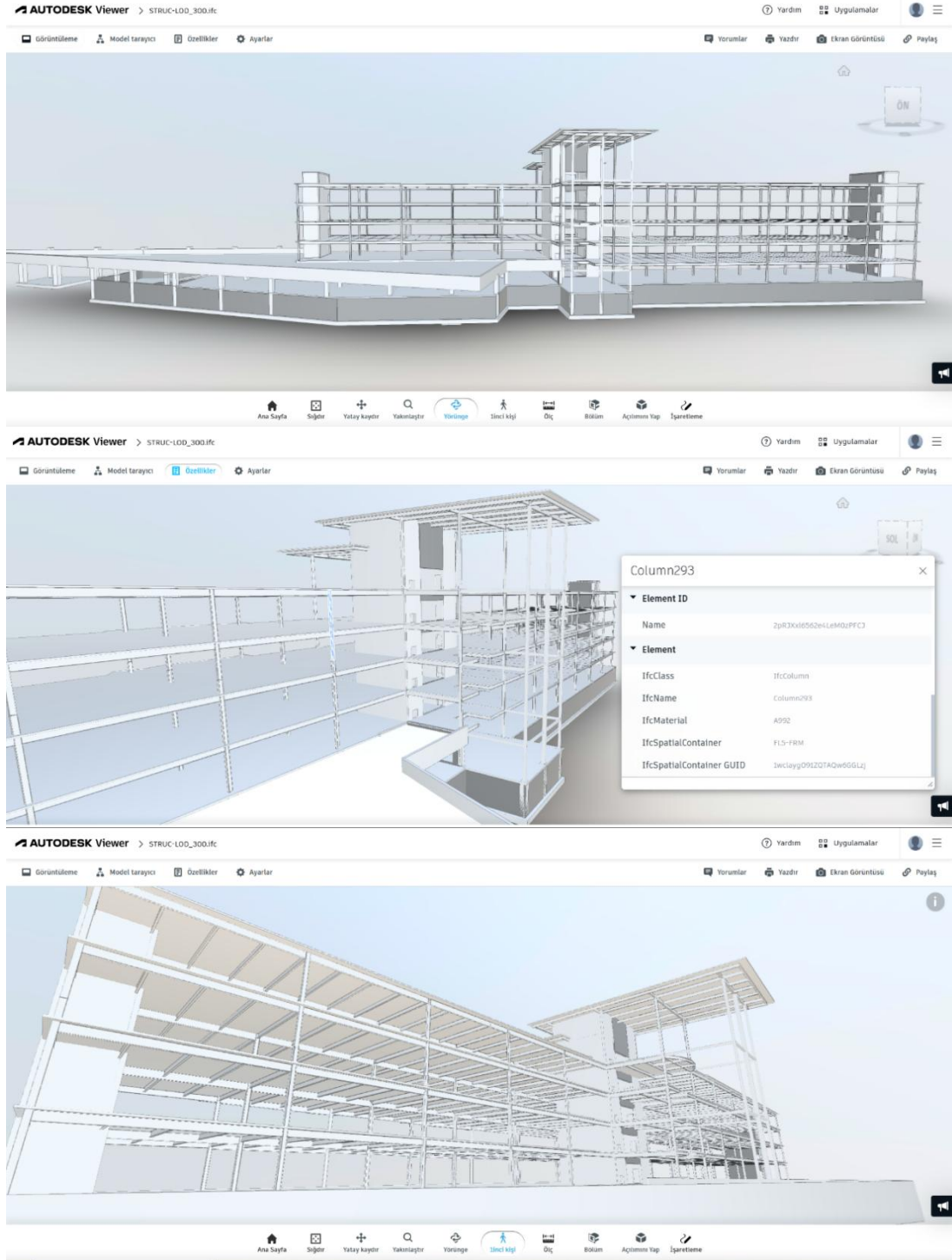
Tablo 7.6’da görüldüğü üzere, IFC tarafında yer alan tüm ana yapısal bileşenler CityGML tarafında eksiksiz karşılık bulmuştur. *IfcBuilding* nesnesi doğrudan *Building* sınıfına, *IfcSlab* öğeleri *FloorSurface*’e, *IfcWall* öğeleri *WallSurface*’e ve *IfcColumn* ile *IfcBeam* öğeleri birleştirilerek *BuildingInstallation* sınıfına aktarılmıştır. Her iki formatta da nesne sayılarının birebir uyuşması, dönüşüm sürecinde veri kaybı yaşanmadığını ve modelin yapısal bütünlüğünün korunduğunu göstermektedir. Elde edilen bu sonuç, dönüşüm iş akışının doğru tanımlandığını ve LoD seviyesinde tutarlı bir eşleşme elde edildiğini ortaya koymaktadır. Dönüşüm işlemleri FME üzerinde toplamda 13 saniye sürmüştür.

Tablo 7.6 Yapısal Model Nesnelerinin CityGML ile Eşleştirilmesi

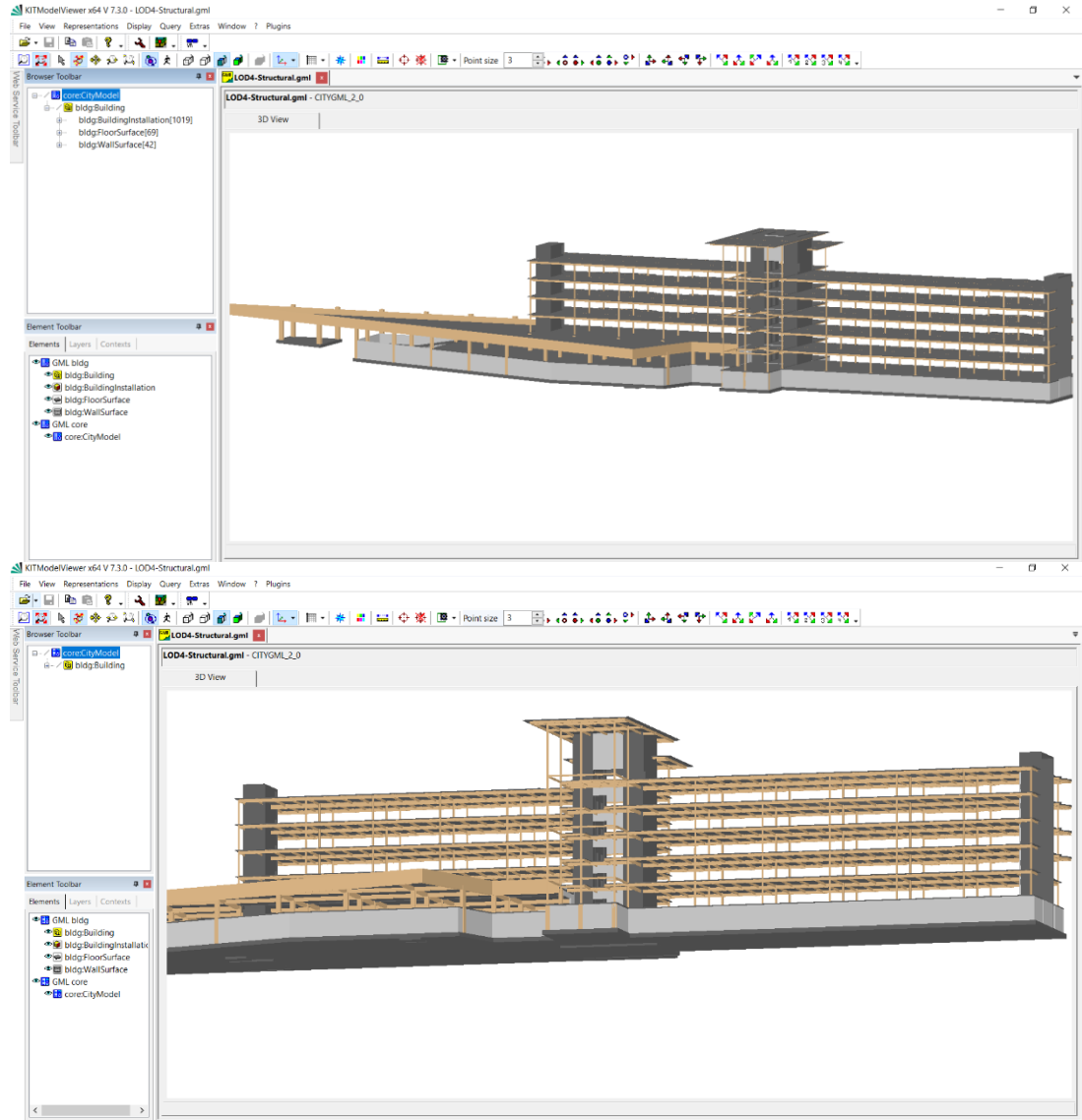
IFC Sınıfı	IFC Adet	CityGML Sınıfı	CityGML Adet	Dönüşüm Oranı
IfcBuilding	1	Building	1	%100
IfcSlab	69	FloorSurface	69	%100
IfcWall	42	WallSurface	42	%100
IfcColumn IfcBeam	175 + 844 = 1019	BuildingInstallation	1019	%100

Her iki görsel grubu birlikte değerlendirildiğinde, dönüşümün geometrik bütünlüğü koruduğu ancak semantik düzeyde sadeleştirme yaptığı görülmektedir. IFC’nin ayrıntılı mühendislik temsili, CityGML’de şehir modeli mantığına uygun daha genelleştirilmiş sınıflarla ifade edilmiştir.

Şekil 7.33 IFC Formatındaki Yapısal Modelin Farklı Açılardan Görünümü



Şekil 7.34 IFC Structural Modelinin Farklı Açılar ile CityGML Gösterimi



IFC formatındaki modelde kolon, kiriş, döşeme ve duvar gibi bileşenler ayrıntılı ve nesne bazlı biçimde tanımlanmıştır (Şekil 7.33). CityGML'e dönüştürülmüş halinde ise aynı yapı geometrisi korunmuş ancak IFC'deki ayrıntılı nesneler daha üst düzey semantik sınıflara aktarılmıştır. Örneğin, *IfcBeam* ve *IfcColumn* elemanları “*BuildingInstallation*” altında toplanmış, *IfcSlab* öğeleri “*FloorSurface*” olarak, *IfcWall* öğeleri ise “*WallSurface*” olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 7.34). Sonuç olarak, dönüşüm sürecinde geometrik bütünlüğün korunduğunu ancak semantik düzeyde bir sadeleştirme yapıldığını göstermektedir. IFC'nin ayrıntılı

mühendislik temsili, CityGML’de şehir modeli mantığına uygun olarak daha genelleştirilmiş sınıflarla ifade edilmiştir.

Literatürde FME kullanılarak gerçekleştirilen IFC’den CityGML’e dönüşümlerin tamamının eksiksiz gerçekleşmediği, geometrik dönüşüm ve semantik eşlemenin halen yetersiz düzeyde olduğu ve bu alanlarda geliştirmelerin sürdüğü belirtilmektedir. Tam ve kayıpsız bir dönüşüm gerçekleştirilemediği için yüksek aktarım yüzdelere ulaşmanın güç olduğu birçok çalışmada vurgulanmıştır. Akademik araştırmalarda ortaya konan yöntemler ise teorik olarak oldukça güçlüdür, fakat henüz yaygın kullanıma yönelik olgun bir yazılıma dönüşmemiştir. Henüz IFC’den CityGML’e aktarım için kesin ve eksiksiz bir yöntem bulunmamaktadır. En yaygın uygulama Safe Software’in FME aracı üzerinden yapılmakta olup, bu çözüm pratik fakat yalnızca CityGML 2.0 desteği sunmakta ve semantik verilerin önemli kısmı kaybolmaktadır. Almanya ve Hollanda’da yürütülen araştırmalarda CityJSON ara formatı, ontoloji tabanlı eşleme ve semantik zenginleştirme yaklaşımları öne çıkmaktadır. Henüz olgunlaşmamış olmakla birlikte, ontoloji ve yapay zekâ tabanlı yöntemler, gelecekte aktarımın doğruluğunu artıracak en umut verici yönelimler olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, IFC’den CityGML formatına dönüşüm yapabilen araçlar ekosistemi hâlen gelişim sürecindedir. Ticari çözümler (örneğin FME) güçlü dönüşüm imkânları sunsa da belirli bir uzmanlık gerektirir. Açık kaynak alternatifler (*BIMserver* veya *IfcOpenShell* gibi) maliyet avantajı sağlasa da güncellik ve bakım açısından sınırlı kalabilmektedir. Daha basit arayüzler sunan SketchUp eklentisi türü araçlar kullanım kolaylığıyla öne çıksa da ürettikleri çıktı çoğu zaman semantik açıdan zayıftır. Bunun yanında, ArcGIS ekosistemi CityGML binalarını doğrudan I3S formatına dönüştürmeye imkân tanımakta ve böylece bu içeriklerin web, mobil ya da masaüstü ortamlarda yüksek performansla yayınlanmasını sağlamaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

BIM, parametrik modelleme mantığıyla akıllı nesneler üzerinden veri bütünlüğü sağlar ve LOD, LOG, LOIN kavramlarıyla farklı ayrıntı düzeylerinde bilgi sunarak süreçlerin verimli yönetilmesine olanak tanır. Bu bilgi yoğunluğunu farklı düzeylerde kullanıcı ihtiyaçlarına göre sunarak bilgi karmaşasının da önüne geçmektedir. Bu özellikleriyle BIM, inşaat projelerinde verimliliğin artırılması ve süreçlerin bütüncül biçimde yönetilmesi açısından kullanımı yaygınlaştırılmalıdır.

BIM boyutları, modelin sunduğu işlevlerin her birini ayrı bir boyut olarak ele alarak n-boyutlu bir yapıya genişletilebilmektedir. Bu doğrultuda, CBS endüstrisi ile olan etkileşimleri için BIM modeline konum verisinin eklenmesi hatta BIM verilerine coğrafi veriler eklenerek farklı analiz ve katkıların elde edilmesi de yeni bir boyut olarak eklenmelidir.

BIM–CBS etkileşiminin teknik düzeyde olgunlaşması kadar, kurumsal yapılanmanın da bu süreci desteklemesi önem taşımaktadır. Bu nedenle, CBSGM öncülüğünde bir BIM–CBS Entegrasyonu Çalışma Heyeti kurulmalıdır. Bu heyet BIM kapsamında, ulusal düzeyde standartların geliştirilmesi, veri tanımlama dokümanlarının güncellenmesi, veri sözlüklerinin oluşturulması ve kurumlar arası bilgi paylaşımının ortak bir yapı altında yürütülmesi gibi çalışmalar yapmalıdır. Böylece ülkemizde BIM–CBS entegrasyonunun kurumsal ve teknik temelleri güçlendirilecektir.

CBS yönünden değerlendirildiğinde, INSPIRE Bina Veri Spesifikasyonu Teknik Kılavuzu kapsamında tanımlanan LoD şemaları, gelecekte BIM–CBS entegrasyon sürecine katkı sunabilecek niteliktedir. Bu nedenle, LoD şemalarının TUCBS 3B bina temasında da oluşturulması gereklidir. Çünkü bu şemalar her detay seviyesinde hangi geometri ve özniteliklerin kullanılacağını açıkça tanımlar. Böylece CityGML modeli oluştururken oluşabilecek yorumsal farklılıklar önlenir ve kurumlar arası uygulama birliği sağlanmış olur.

Bina Teması Veri Tanımlama Dokümanı (26.10.2022 tarihli ve 31995 sayılı Resmî Gazete, Versiyon 2.0) incelendiğinde, “YapıModeli–Bina3B” şemasında

yalnızca 21 IFC sınıfının eşleştirildiği görülmektedir. Oysa IFC4.3 sürümünde 700'ün üzerinde sınıf bulunmaktadır. Entegrasyonun etkin biçimde yürütülebilmesi için doküman bir sonraki sürümünde güncellenmeli; mekanik, elektrik, HVAC ve MEP sistemlerine ait varlıkların da TUCBS ile eşleştirilmesi sağlanmalıdır. Ayrıca mevcut sınıf tanımlamaları detaylandırılmalı, tür (*type*) ve özellik kümesi (*property set*) gibi semantik bilgiler de modele eklenmelidir.

Güncellemelerin yalnızca içerik düzeyinde değil, standart uyumu açısından da ele alınması gerekmektedir. TUCBS Bina Veri Tanımlama Dokümanı'na CBS-BIM alanındaki ilgili ISO standartlarının ayrıntılı biçimde entegre edilmesi, ulusal entegrasyon altyapısının güçlendirilmesi açısından önemlidir.

Tezde IFC, CityGML ve LandInfra standartları incelenmiş ve elde edilen bulgular sonucunda LandInfra'nın özellikle arazi ve altyapı verilerinin yönetimi açısından BIM ve CBS arasında tamamlayıcı bir rol üstlendiği gösterilmiştir. Bu nedenle söz konusu standardın ulusal düzeyde değerlendirilmesi ve benimsenmesi önerilmektedir.

Standartların uygulanabilir hale gelmesi için, veri alışverişini doğrudan yönetecek teknik bir modelin tanımlanması gerekmektedir. TUCBS bina temasına özgü bir IFC-MVD yapısının tanımlanmasıdır. Böyle bir yapı Revit, Archicad ve Allplan gibi yazılımların doğrudan TUCBS uyumlu çıktı üretmesini sağlayarak kurumlar arası veri paylaşımında birlik yaratacaktır.

Ulusal düzeyde bina kimlik bütünlüğünü güçlendirmek amacıyla, MAKS Yapı Kimlik Numarası ve UAVT Kimlik Numarası ile entegre çalışan TUCBS No'nun, BIM modellerinde bina düzeyinde tanımlanan IfcBuilding varlığıyla ilişkilendirilmesi önerilmektedir. Böylece CBS ve BIM ortamları arasında aynı bina için ortak bir kimlik yapısı oluşturularak veri bütünlüğü ve sistemler arası entegrasyon sağlanabilecektir.

BIM ve CBS entegrasyonu sırasında oluşabilecek yorumsal farkları gidermek ve veri yani bilgi kaybını en aza indirmek için bir LoD-LOD eşleme kılavuzu oluşturulmalıdır. Böylece her iki sistemdeki farklı ayrıntı ve gelişim düzeylerinin dönüşüm sırasında eşleştirilmesi kolaylaştırılmış ve belirli bir standartla sunulmuş

olur. Bu eşleştirmeler ilk olarak temel düzeyde sunulmalı daha sonraki aşamalarda ise analiz senaryolarına yönelik olarak geliştirilmelidir.

Entegrasyon için FME Workbench veya Python tabanlı ETL iş akışlarının geliştirilmesi, kurumların standartlara uygun dönüşüm yapmasını kolaylaştıracaktır. Böylece, farklı kurumların modellerini ulusal koordinat sistemleriyle uyumlu biçimde üretmesine ve CBS ortamına entegre etmesine katkı sağlayacaktır.

BIM verilerinin konumsal doğruluğunun sağlanabilmesi için, coğrafi referanslama desteği sunan ve IfcMapConversion sınıfını içeren IFC4 ve sonrası sürümlerin kullanılması zorunlu hale getirilmelidir. Bu sayede modellerin küresel koordinat sistemleriyle tam uyumlu biçimde konumlandırılması ve CBS entegrasyonunda tutarlılığın sağlanması mümkün olacaktır.

BIM–CBS entegrasyonunun etkin biçimde gerçekleştirilebilmesi için IFC tabanlı BIM modellerinin coğrafi referanslama aşamalarını açıklayan bir rehber hazırlanmalıdır. Bu rehberlerde geometrik ve semantik dönüşüm yöntemleri açıklanarak bilgi kaybını en aza indirecek çözümler sunulmalıdır.

CBSGM tarafından geliştirilen web tabanlı 3B görüntüleme uygulaması olan PLATO, kurumsal düzeyde IFC verilerinin görüntülenmesine imkân tanıyan ilk uygulamalardan biridir. IFC verilerinin OGC 3D Tiles, Esri I3S gibi modern 3B veri odaklı formatlarla servis edilebilmesi için gerekli teknik eklenti ve sunucu altyapısı geliştirilebilir. Böylece BIM verilerinin yalnızca belirli platformlarda değil ArcGIS, Cesium, QGIS gibi farklı CBS yazılımlarında da görselleştirilip analiz edilebilir hale gelecektir. Ayrıca PLATO'nun, IFC ve CityGML modellerinde yüksek LoD düzeyine ait bina detaylarını da göstermesi önerilmektedir.

3B şehir yönetim platformlarında BIM modellerinin güncel ve bütünlük olarak tutulmasını sağlamak amacıyla mevzuat ve teknik çalışmaların yürütülmesi gereklidir. Platform üzerinden çevre, şehircilik, afet yönetimi ve iklim odaklı analizlerin gerçekleştirilebilmesi, model verilerinin dinamik biçimde kullanılmasına olanak tanıyacaktır.

Tez sürecinde edinilen deneyimler, BIM yazılımlarına erişimin hem maliyet hem de kullanım açısından çeşitli zorluklar içerdiğini göstermiştir. BIM–CBS entegrasyonu denemelerinde ise farklı yazılımların bir arada kullanılması süreci daha karmaşık hale getirmiştir. Bu nedenle, IFC modellerinin coğrafi olarak referanslanabildiği ve CityGML formatına otomatik dönüştürülebildiği tek bir platformun geliştirilmesi, entegrasyon sürecini büyük ölçüde kolaylaştıracaktır.

Tezin uygulama bölümünde, FME Workbench aracılığıyla IFC formatındaki model, CityGML LoD4 yapısına başarıyla dönüştürülmüştür. Dönüşüm sonucunda modelin temel geometrik yapısı ve semantik hiyerarşisi korunmuş, kapı–duvar–kat–bina ilişkileri CBS ortamında analiz edilebilir bütünlükte aktarılmıştır. Bununla birlikte, CityGML 2.0 şemasının sınıf kısıtları nedeniyle bazı IFC nesneleri daha genel kategoriler altında toplanmış, kaplama ve detay bileşenlerinde kısmi bilgi kaybı gözlenmiştir. Buna rağmen temel geometrilerin korunması, modelin CBS ortamında görselleştirme ve temel kentsel analizler için kullanılabilir nitelikte olduğunu göstermektedir.

Bu deneyim, IFC verilerinin CBS ortamına aktarımında geometrik ve semantik bilgilerin tam bütünlükte korunmasının hâlâ güç olduğunu göstermektedir. IFC–CityGML dönüşümünün FME üzerinden gerçekleştirilebilmesi, uygulama düzeyinde birlikte çalışabilirliğin pratik biçimde sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Ancak semantik aktarımın eksiksiz gerçekleşebilmesi için, kavramlar arası ilişkileri tanımlayabilen semantik web teknolojilerinin kullanılması gerekmektedir. Bu yaklaşım, ontolojilerin belirlenmesi ve kavramsallaştırma süreçlerinin geliştirilmesi gibi alanlarda ileri araştırmalara ihtiyaç duymaktadır.

Bu nedenle, BIM ve CBS entegrasyonuna yönelik çalışmalarda yazılım araçları ve veri formatı seçiminin, proje türü, beklenen çıktı ve kullanılacak analiz yöntemleriyle uyumlu biçimde yapılması önerilmektedir. Gelecekte FME'nin CityGML 3.0 gibi güncel şemaları desteklemesi, IFC nesnelerinin daha doğru eşleştirilebilmesini ve iç mekân temsillerinin ayrıntı düzeyinin artırılmasını mümkün kılacaktır.

FME tabanlı uygulama çalışmaları sırasında, yukarıda önerilen geliştirmelerin yalnızca teorik değil, uygulamada da zorunlu olduğu anlaşılmıştır. FME Workbench kullanımı sırasında, farklı detay seviyeleri için LoD rehberlerinin hazırlanması ve özel eşleştirme kurallarının geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu tür geliştirmeler, semantik kayıpların azaltılmasına ve modelin CBS kullanım senaryolarına daha yüksek doğrulukla uyarlanmasına katkı sağlayacaktır.

Küresel ölçekte geliştirilen BIM stratejileri, Türkiye için yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır. İngiltere'nin kademeli zorunluluk modeli, Almanya ve İtalya'nın kamu projelerinden başlayarak sektöre yayılan BIM stratejileri, Singapur'un CORENET X sistemi ve Estonya'nın e-inşaat platformu, dijital ruhsat ve denetim süreçlerinin BIM tabanlı yürütülmesine örnek oluşturmaktadır. Finlandiya'da geliştirilen IFC tabanlı pilot projeler, asgari BIM veri setlerini tanımlamış; Hollanda ve Dubai'deki dijital ruhsat sistemleri ise BIM-CBS entegrasyonunun yerel yönetim süreçlerine katkısını göstermiştir. Güney Kore'de kamu ihalelerinden başlayarak özel sektöre uzanan kademeli BIM zorunluluğu uygulanırken, Çin ve Japonya BIM'i dijital ikiz ve sürdürülebilirlik hedefleriyle ilişkilendirmiştir. ABD'deki ulusal BIM nesne kütüphanesi (UBOL) benzeri bir yapının Türkiye'de de oluşturulması, standart bileşenlerin kullanımını kolaylaştıracak ve veri uyumunu güçlendirecektir. Türkiye'de yürütülmekte olan e-Proje Yönetim Sistemi ise BIM alanında önemli bir gelişme olup, ulusal ölçekte standartlaşma, veri paylaşımı ve dijital inşaat dönüşümünün hızlanması açısından kritik bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Kurum ve kuruluşların dijital dönüşüm süreçlerini planlayabilmeleri için BIM olgunluk seviyeleri temel alınarak mevcut durumlarını değerlendirmeleri önerilmektedir. Bu değerlendirme, hangi aşamada olunduğunun görülmesini, bir üst seviyeye geçiş için gerekli teknik ve yönetsel yeterliliklerin belirlenmesini ve dijital dönüşüm stratejilerinin daha sistematik biçimde geliştirilmesini sağlayacaktır.

Farklı Bakanlık ve kurumlarda yürütülen BIM projeleri incelendiğinde, ulusal ölçekte ortak bir veri modeli ve standartlar bütününe geliştirilmesi gerektiği görülmektedir. Aksi halde kurumların kendi çözümlerini bağımsız biçimde uygulaması, veri paylaşımında uyumsuzluklara ve bilgi kayıplarına yol açabilir. Bu nedenle birlikte çalışabilirliği güvence altına alacak, BIM verilerinin CBS ile

entegrasyonunu kolaylaştıracak ve strateji belgelerinde tanımlanan dijitalleşme hedefleriyle uyumlu ulusal standartların oluşturulması kritik bir ihtiyaçtır. Bu kapsamda, BIM alanındaki ISO standartlarının benimsenmesi ve ulusal düzeyde referans alınması da standartlaşma sürecinin temel adımlarından biri olmalıdır. Ayrıca yürütülen proje ve çalışmalar, kurumların BIM teknolojisinin sunduğu faydaları giderek daha fazla fark ettiğini ve bu yaklaşımı kendi kurumsal süreçlerine entegre etmeye başladığını göstermektedir.

Şubat 2025'te gerçekleşen Ulusal BIM Çalıştayı çıktıları doğrultusunda, kısa vadede BIM'in ulusal ölçekte koordinasyonunu sağlayacak bir Dijital İnşaat Dönüşüm Ofisi'nin kurulması, kamu projelerinde pilot uygulamaların hayata geçirilmesi ve eğitim-farkındalık programlarının yaygınlaştırılması önerilmiştir. Orta vadede belediyeler ve meslek kuruluşlarının sürece entegre edilmesi, ulusal BIM portalı üzerinden standart veri paylaşımının sağlanması ve sertifikasyon sistemlerinin oluşturulması gerektiği belirtilmiştir. Uzun vadede ise tüm kamu projelerinde BIM kullanımının zorunlu hale getirilmesi, yükseköğretim müfredatına BIM'in entegre edilmesi ve uluslararası akreditasyonlarla desteklenen ulusal bir BIM enstitüsünün kurulması önerilmektedir.

Birçok ülkede olduğu gibi Türkiye'de de kamu kurumları veya meslek odalarının öncülüğünde BIM tasarım ve uygulama yarışmaları düzenlenmesi, başarılı projelere ödüller verilmesi ve bu sayede iyi uygulama örneklerinin görünür kılınarak sektöre teşvik edici bir mekanizma oluşturulabilir. Bu yarışmalar BIM'in teknik bir zorunluluktan çok yenilikçi ve prestijli bir yöntem olarak benimsenmesine katkı sağlayacaktır.

On İkinci Kalkınma Planı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile CBSGM Strateji Planı incelendiğinde, BIM'in dijitalleşme, sürdürülebilirlik ve afetlere dirençli kentleşme hedeflerinde temel bir araç olarak konumlandırılabilceği görülmektedir. Tez bulguları da bunu desteklemekte; BIM'in CBS ile entegrasyonu sayesinde kentsel dönüşüm, sürdürülebilirlik ve afet yönetimi süreçlerine önemli katkılar sağlayabilmesi için bu yaklaşımın ulusal ölçekte benimsenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Akıllı şehirlerin sürdürülebilirlik, veriye dayalı planlama ve kaynak verimliliği hedeflerine ulaşması sürecine katkı sunacak olan BIM teknolojilerinin, ulusal düzeyde standartlaştırılarak şehirlerin dijital altyapısına entegre edilmesi önerilmektedir. Kent dijital ikizlerinin geliştirilmesinde BIM'in temel veri kaynağı olarak kullanılması, şehir yönetiminde çok katmanlı ve etkileşimli karar destek mekanizmalarının kurulmasını sağlayacak; CBS ve sensör verileriyle bütünleşik biçimde çalışarak kaynak verimliliğini, vatandaş katılımını ve sürdürülebilir akıllı şehir yönetişimini güçlendirecektir.

Ülkemizde yürütülen kentsel dönüşüm projelerinde BIM teknolojilerinin kullanılması; planlama, tasarım, inşaat ve işletme süreçlerinde şeffaflık, koordinasyon ve kaynak verimliliği sağlayarak projelerin daha etkin biçimde yönetilmesine katkı sunabilir. BIM tabanlı çalışma yaklaşımı, çakışma analizi, görselleştirme, iş güvenliği, lojistik planlama, bakım-onarım ve atık yönetimi gibi alanlarda süreçleri kolaylaştırmakta; maliyet ve zaman kayıplarını azaltmaktadır. Ayrıca karbon ayak izinin düşürülmesi, enerji ve su tüketiminin optimize edilmesi ve malzeme kullanımının verimli hale getirilmesi gibi çevresel ve ekonomik faydalar da sunmaktadır. Bu nedenle kentsel dönüşüm uygulamalarında BIM teknolojilerinin kullanılması ve yaygınlaştırılması stratejik bir gereklilik olarak görülmektedir.

Afet boyutunda BIM-CBS entegrasyonu, deprem, sel ve bina yangını gibi senaryoların çok boyutlu biçimde simüle edilmesine, risklerin önceden belirlenmesine ve tahliye planlarının geliştirilmesine olanak tanır. Sel durumlarında suyun bina bileşenlerine etkisi, yangın senaryolarında ise güvenli tahliye rotaları ve acil müdahale planları gerçeğe yakın biçimde modellenebilir. Böylece afet öncesi hazırlık, afet anı ve sonrası süreçler bütüncül bir yaklaşımla yönetilebilir. Nokta bulutu ve görüntü işleme teknikleriyle desteklenen BIM-CBS uygulamaları, hasar tespitini hızlandırmakta ve onarım planlamasının güvenilir verilere dayalı yapılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle afet yönetimi süreçlerinde BIM teknolojilerinin de etkin biçimde kullanılması gerekmektedir.

BIM'in geleceğe yönelik gelişim alanlarından biri de yapay zekâ tabanlı otomatik model üretim sistemleridir. Son yıllarda geliştirilen Spacio, TestFit veya Finch3D gibi uygulamalar, kullanıcı tarafından girilen arsa boyutu, kat yüksekliği

veya fonksiyonel gereksinimler gibi parametrelere dayalı olarak otomatik hacimsel modeller ve yerleşim planları üretebilmektedir. Benzer şekilde mevcut 2B mimari çizimlerin ya da PDF planların yapay zekâ algoritmalarıyla işlenerek otomatik biçimde kat planı modellerine veya doğrudan BIM nesnelere dönüştürülmesi ile ilgili çalışmalar geliştirilebilir. Bu tür çözümler özellikle kentsel dönüşüm projelerinde arşivde bulunan çok sayıdaki eski projenin hızla dijitalleştirilmesi ve BIM ortamına aktarılması açısından büyük önem taşır. Dolayısıyla yapay zekâ destekli otomatik model üretimi ve 2B'den 3B'ye dönüşüm mekanizmalarının geliştirilmesi, BIM'in yaygınlaşmasını hızlandıracak ve kurumsal süreçlerde standardizasyonu kolaylaştıracaktır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması BIM alanındaki Bakanlık stratejilerine katkı sağlamak amacıyla yürütülmüş, ulusal politika belgelerinde tanımlanan stratejik hedeflerin literatürdeki karşılıkları incelenerek bunlara yönelik somut katkılar ortaya konmuştur.

KAYNAKÇA

1. SACKS R., Eastman C., Lee G., Teicholz P. 2018, BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers, 3. Baskı, Wiley, 688 s., ISBN: 978-1-119-28753-7
2. PREIDEL C., Borrmann A. 2016, Towards Code Compliance Checking on the Basis of a Visual Programming Language, Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 21, 402. <http://www.itcon.org/2016/25> (Erişim tarihi: 09.07.2025)
3. YILMAZ ŞENEL K. 2024, BIM Entegrasyonunda Akıllı Nesnelerin Rolü – Sistemik Literatür Taraması, yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilişim Anabilim Dalı, Mimari Tasarımda Bilişim Programı, Mayıs 2024.
4. MAÇKA KALFA S. 2018, Building Information Modeling (BIM) Systems and Their Applications in Turkey, Journal of Construction Engineering, Management & Innovation, 1, 55–66. <https://doi.org/10.31462/jcemi.2018.01055066>
5. SUCCAR B. 2009, Building Information Modelling Framework: A Research and Delivery Foundation for Industry Stakeholders, Automation in Construction, 18, s. 357–375, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>
6. BORKOWSKI A. S. 2023, A Literature Review of BIM Definitions: Narrow and Broad Views, Technologies, 11(6), s. 176, <https://doi.org/10.3390/technologies11060176>
7. AZHAR S. 2011, Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry, Leadership and Management in Engineering, 11(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
8. BUILDINGSMART INTERNATIONAL (bsi) 2024, Industry Foundation Classes, <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/> (Erişim tarihi: 09.07.2025)
9. WANG T., Gan V. J. L., Hu D., Liu H. 2022, Digital Twin-Enabled Built Environment Sensing and Monitoring Through Semantic Enrichment of BIM with SensorML, Automation in Construction, 144, 104625. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104625>
10. VOLK R., Stengel J., Schultmann F. 2014, Building Information Modeling (BIM) for Existing Buildings – Literature Review and Future Needs, Automation in Construction, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
11. AKBARI S., Sheikhhoshkar M., Pour Rahimian F., Bril El Haouzi H., Najafi M., Talebi S. 2024, Sustainability and Building Information Modelling: Integration, Research Gaps, and Future Directions, Automation in Construction, 163, 105420. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105420>

12. ELEFTHERIADIS S. 2014, BIM Integrated Optimisation Framework for Environmentally Responsible and Structurally Efficient Design Systems: A Holistic Cloud Based Approach, Doktora Tezi. (Erişim tarihi: 26.07.2025)
13. ZADEH P. A., Han S., Staub-French S. 2023, Exploring BIM Implementation Challenges in Complex Renovation Projects: A Case Study of UBC's BRDF Expansion, *Applied Sciences*, 13(23), 12563. <https://doi.org/10.3390/app132312563>
14. ALIREZAEI M., Noori M., Tatari O., Mackie K. R., Elgamal A. 2016, BIM-Based Damage Estimation of Buildings under Earthquake Loading Condition, *Procedia Engineering*, 145, 1051–1058. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.136>
15. GETULI V., Bruttini A., Rahimian F. 2025, Parametric Design Methodology for Developing BIM Object Libraries in Construction Site Modeling, *Automation in Construction*, 170, 105897.
16. AMIREBRAHIMI Sam, RAJABIFARD Abbas, MENDIS Priyan, NGO Tuan, 2015, A Framework for a Micro-Scale Flood Damage Assessment and Visualization for a Building Using BIM-GIS Integration, *International Journal of Digital Earth*, 9, s. 363–386.
17. LIU Jiayi, ZHANG Rui, YAN Weidong, SUN Li 2021, Evacuation of Building Fire Personnel Based on BIM+GIS: A Review, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 787, 012173, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/787/1/012173>
18. POZANTI B. Ö. 2024, Türk İnşaat Sektöründe BIM Uygulamasının Fizibilitesi, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi
19. BORKOWSKI Andrzej 2023, Evolution of BIM: Epistemology, Genesis and Division into Periods, *Journal of Information Technology in Construction*, 28, s. 646–661, <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2023.034>
20. WONG J. K. W., ZHOU J. 2015, Enhancing Environmental Sustainability over Building Life Cycles through Green BIM: A Review, *Automation in Construction*, 57, s. 156–165.
21. ZHU J., WU P. 2022, BIM/GIS Data Integration from the Perspective of Information Flow, *Automation in Construction*, 136(2), 104166.
22. LUEBKE D., REDDY M., COHEN J. D., VARSHNEY A., WATSON B., HUEBNER R. 2003, *Level of Detail for 3D Graphics*, Morgan Kaufmann, San Francisco
23. SUCCAR B. (Ed.), BOLPAGNI M. (Yrd. Ed.), IŞIKDAĞ Ü., ESEN BARUTÇU B., ÇAPKIN D. F. (Türkçe Ed.), 2019, *BIM Terimleri Sözlüğü I*, Yayına Hazırlayan: b. kitap (Binat İletişim & Danışmanlık), Yayın Koordinatörü: N. İmamoğlu, Redaksiyon: K. B. Erdem, Tasarım: G. Dönmez, 1. Baskı, İstanbul, ISBN: 978-605-81332-2-8.

24. ABUALDENIEN J., BORRMANN A., 2022, Levels of Detail, Development, Definition, and Information Need: A Critical Literature Review, Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 27, Özel Sayı: The Eastman Symposium, 363–392, <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.018>
25. BIMFORUM 2024, Level of Development (LOD) Specification – Part I, II, <http://bimforum.org/wp-content/uploads/2024/11/LOD-Spec-2024-Part-I-official-English.pdf> (Erişim tarihi: 22.07.2025).
26. UNITED-BIM 2019, BIM Level of Development (LOD) 100, 200, 300, 350, 400, 500, <https://www.united-bim.com/bim-level-of-development-lod-100-200-300-350-400-500/> (Erişim tarihi: 22.07.2025).
27. SPECTER AUTOMATION 2023, Level of Development (LOD): Looking at BIM Data Across the Building Lifecycle, <https://medium.com/specter-automation-insights/level-of-development-lod-looking-at-bim-data-across-the-building-lifecycle-7477fee5cc83> (Erişim tarihi: 22.07.2025).
28. STRUCTURE MAGAZINE 2021, Creating Clarity and Scoping Profits in BIM with LOD 350, <https://www.structuremag.org/article/creating-clarity-and-scoping-profits-in-bim-with-lod-350/> (Erişim tarihi: 22.07.2025).
29. TRIMBLE 2025, What is LOD and How Its Levels Impact Your 3D BIM Model, 18 Mayıs 2025, <https://www.trimble.com/blog/construction/en-US/article/what-are-lod-levels-how-they-impact-your-3d-bim-model> (Erişim tarihi: 22.07.2025)
30. BRUMANA R., STANGA C., BANFI F. 2021, Models and Scales for Quality Control: Toward the Definition of Specifications (GOA-LOG) for the Generation and Re-use of HBIM Object Libraries in a Common Data Environment, Applied Geomatics, 14, <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00351-2>
31. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). (2025). ISO 19650 series standards, https://www.iso.org/search.html?PROD_isoorg_en%5Bquery%5D=19650 (Erişim tarihi: 12.08.2025)
32. SUN C., CHEN H., LONG R., LIAO R. 2022, Research on BIM Application Two-Dimensional Maturity Model, Buildings, 12(11), s. 1960, <https://doi.org/10.3390/buildings12111960>
33. DEMİR C., KOCABAŞ I. 2010, Project Management Maturity Model (PMMM) in Educational Organizations, Procedia – Social and Behavioral Sciences, 9, s. 1641–1645.
34. SZELAGOWSKI M., BERNIAC-WOŹNY J. 2020, The Adaptation of Business Process Management Maturity Models to the Context of the Knowledge Economy, Business Process Management Journal, 26, s. 212–238.
35. RASHID N., KHAN S. U., KHAN H. U., ILYAS M. 2021, Green-Agile Maturity Model: An Evaluation Framework for Global Software Development Vendors, IEEE Access, 9, s. 71868–71886.

36. RYTOVA E., VEREVKA T., GUTMAN S., KUZNETSOV S. 2020, Assessing the Maturity Level of the Digital Government of Saint Petersburg, *International Journal of Technology*, 11, s. 1081–1090.
37. ALGHAIL A., YAO L., ABBAS M., BAASHAR Y. 2022, Assessment of Knowledge Process Capabilities Toward Project Management Maturity: An Empirical Study, *Journal of Knowledge Management*, 26, s. 1207–1234.
38. JIA G., NI X., CHEN Z., HONG B., CHEN Y., YANG F., LIN C. 2013, Measuring the Maturity of Risk Management in Large-Scale Construction Projects, *Automation in Construction*, 34, s. 56–66.
39. KAZANJIAN R. K., DRAZIN R. 1989, An Empirical Test of a Stage of Growth Progression Model, *Management Science*, 35, s. 1489–1503.
40. HIDAYATI P. B., BUDIARDJO E. K., SOLICHAH I. 2018, Global Software Development and Capability Maturity Model Integration: A Systematic Literature Review, *Proceedings of the 3rd International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, Roxbury, MA, USA.
41. GOVERNMENT CONSTRUCTION CLIENT GROUP 2011, Strategy Paper for the Government Construction Client Group: From the BIM Industry Working Group – March 2011, Government Construction Client Group, United Kingdom. <https://www.cdcb.cam.ac.uk/system/files/documents/BISBIMstrategyReport.pdf> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
42. UNITED-BIM 2025, BIM Maturity Levels Explained: Level 0, 1, 2, 3, <https://www.united-bim.com/bim-maturity-levels-explained-level-0-1-2-3/> (Erişim tarihi: 22.07.2025)
43. MONTEIRO A., MARTINS J. P. 2013, A Survey on Modeling Guidelines for Quantity Takeoff-Oriented BIM-Based Design, *Automation in Construction*, 35, s. 238–253.
44. BARLISH K., SULLIVAN K. 2012, How to Measure the Benefits of BIM — A Case Study Approach, *Automation in Construction*, 24, s. 149–159.
45. GODAGER B., MOHN K., MERSCHBROCK C., KLAKEGG O. J., HUANG L. 2022, Towards an Improved Framework for Enterprise BIM: The Role of ISO 19650, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 27, s. 1075–1103, <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.053>
46. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) 2018, ISO 19650-1:2018 – Organization and Digitization of Information about Buildings and Civil Engineering Works, Including Building Information Modelling (BIM) – Information Management Using Building Information Modelling, <https://www.iso.org/standard/68078.html> (Erişim tarihi: 23.07.2025)
47. ABANDA H., AKINTOLA A., TUHAISE V. V., TAH J. 2025, BIM Ontology for Information Management (BIM-OIM), *Journal of Building Engineering*, 107, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112762>

48. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). (2025). BIM-related ISO standards https://www.iso.org/search.html?PROD_isoorg_en%5Bquery%5D=BIM
49. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). (2025). BIM and GIS-related ISO standards https://www.iso.org/search.html?PROD_isoorg_en%5Bquery%5D=BIM%20GIS
50. EUROPEAN COMMISSION INSPIRE 2019, INSPIRE Data Specification – Buildings: Technical Guidelines, https://knowledge-base.inspire.ec.europa.eu/publications/inspire-data-specification-buildings-technical-guidelines_en (Erişim tarihi: 23.07.2025)
51. OHORI K., BILJECKI F., KUMAR K., LEDOUX H., STOTER J. 2018, Modeling Cities and Landscapes in 3D with CityGML, https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_11
52. SFRACTUM, Level of Development (LoD) Specification, <http://docs.sfractum.com/sfwiki/LoD> (Erişim tarihi: 23.07.2025)
53. BILJECKI F., Stoter J., Ledoux H., Zlatanova S., Çöltekin A. 2015, Applications of 3D City Models: State of the Art Review, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889. <https://doi.org/10.3390/ijgi4042842>
54. TÜRKİYE CUMHURBAŞKANLIĞI 2019, Coğrafi Bilgi Sistemleri Hakkında Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi, Kararname No: 49, Resmî Gazete Tarihi: 07.11.2019, Sayı: 30941.
55. TÜRKİYE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMİ KURULU 2022, 24.08.2022 Tarih ve 2022/1 Sayılı Kurul Kararı, Yayımlandığı Resmî Gazete: 05.12.2022, Sayı: 32034 (Mükerrer)
56. TÜRKİYE ULUSAL COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMİ (TUCBS) 2025, TUCBS Bilgi Entegrasyon Tasarım Kılavuzu (BI_v2-1), https://tucbs.gov.tr/wp-content/uploads/2025/05/TUCBS_BI_v2-1.pdf (Erişim tarihi: 23.07.2025)
57. DING X., YANG J., LIU L., HUANG W., PENG W. 2020, Integrating IFC and CityGML Model at Schema Level by Using Linguistic and Text Mining Techniques, IEEE Access, s. 1–1, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2982044>
58. CESIUM 2024, Cesium Design Tiler and Revit Add-In: Bringing High-Fidelity BIM to 3D Tiles, <https://cesium.com/blog/2024/12/03/cesium-design-tiler-and-revit-add-in/> (Erişim tarihi: 03.12.2024)
59. LOADERS.GL, Building Scene Layer (BSL) Visualization with I3S Module, <https://loaders.gl/docs/modules/i3s/recipes/building-scene-layer> (Erişim tarihi: 16.08.2025)
60. CESIUM 2023, Cesium Ion for Autodesk Revit Quickstart, <https://cesium.com/learn/ion/integrations-learn/integrations-autodesk-revit/> (Erişim tarihi: 16.08.2025)

61. BUILDINGSMART INTERNATIONAL, IFC Model View Definitions (MVDs), <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/mvd/> (Erişim tarihi: 16.08.2025)
62. T.C. CUMHURBAŞKANLIĞI STRATEJİ VE BÜTÇE BAŞKANLIĞI 2023, On İkinci Kalkınma Planı 2024–2028, https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-Ikinci-Kalkinma-Plani_2024-2028_11122023.pdf (Erişim tarihi: 23.07.2025)
63. TÜRKİYE CUMHURİYETİ 2023, 25 Ekim 2023 tarihli ve 32350 sayılı Resmî Gazete 1. Mükerrer. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2023/10/20231025M1.pdf> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
64. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK ve İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI STRATEJİ BAŞKANLIĞI 2024, 2024–2028 Yılı Stratejik Plan, <https://webdosya.csb.gov.tr/db/strateji/haberler/cevre-seh-rc-l-k-ve-ikl-m-deg-s-kl-g--bakanligi-2024-2028-yili-stratej-k-plani-20240205121528.pdf> (Erişim tarihi: 23.07.2025)
65. TÜRKİYE CUMHURİYETİ 2025, 2024–2030 Ulusal Coğrafi Bilgi Stratejisi ve Eylem Planı, 19 Şubat 2025 tarihli ve 32818 (Mükerrer) sayılı Resmî Gazete. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2025/02/20250219M1-3.pdf> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
66. TÜRKİYE CUMHURİYETİ 2025, 11 Mart 2025 tarihli ve 32485 sayılı Resmî Gazete. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2025/03/20250311-1.htm> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
67. T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI 2025, Yapı Bilgi Modellemesi Uygulaması – Akıllı Şehir Uygulama Rehberlik Kılavuzu. <https://www.akillisehirler.gov.tr/wp-content/uploads/fizibilite-rapor/56-Yap%C4%B1%20Bilgi%20Modellemesi.pdf> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
68. T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI 2024, Akıllı Şehir Rehberlik Uygulamaları - PLATO Tanıtım Sunumu ve Videosu. <https://www.akillisehirler.gov.tr/akilli-sehir-rehberlik-uygulamaları-plato-tanitim-sunumu-ve-videosu/> (Erişim tarihi: 26.07.2025).
69. T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI 2025, PLATO 3B Görüntüleyici Uygulaması. <https://plato.csb.gov.tr/3d/viewer/html/main4.html> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
70. T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI STRATEJİ GELİŞTİRME BAŞKANLIĞI 2025, 2024 Birim Faaliyet Raporu. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/strateji/icerikler/2024-birim-faaliyet-raporu-20250131120458.pdf> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
71. T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI 2024, İnşaat Sektöründe Dijital Dönüşüm Başlıyor. <https://meslekihizmetler.csb.gov.tr/insaat-sektorunde-dijital-donusum-basliyor-haber-290451> (Erişim tarihi: 26.07.2025)

72. İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ 2025, e-Proje Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi Projesi: Mevcut Durum Etüt Raporu, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü, Yayınlanmamış çalışma.
73. ILGAR A., Kara A., Çağdaş V. 2024, Identifying Legal, BIM Data and Visualization Requirements to Form Legal Spaces and Developing a Web-Based 3D Cadastre Prototype: A Case Study of Condominium Building, *Land*, 13(9), 1380. <https://doi.org/10.3390/land13091380>
74. TAPU VE KADASTRO GENEL MÜDÜRLÜĞÜ 2025, CBS 3B Kadastro Görüntüleyici Uygulaması. <https://cbs.tkgm.gov.tr/3d/html/giris.html> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
75. TAPU VE KADASTRO GENEL MÜDÜRLÜĞÜ 2025, 3 Boyutlu Kent Modelleri ve Kadastro Projesi. <https://www.tkgm.gov.tr/projeler/3-boyutlu-kent-modelleri-ve-kadastro-projesi> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
76. T.C. ULAŞTIRMA VE ALTYAPI BAKANLIĞI 2022, BIM Teknik Şartnamesi (Rev. No: 03, 02.09.2022). <https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/stratejik-yonetim/bim-teknik-sartnamesi-rev-no-03-02-09-2022.pdf> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
77. T.C. DIŞİŞLERİ BAKANLIĞI, T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI 2023, Türkiye – Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı (Updated 1st NDC), UNFCCC. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-04/T%C3%9CRK%C4%B0YE_UPDATED%201st%20NDC_EN.pdf (Erişim tarihi: 26.07.2025)
78. T.C. ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI 2024, Türkiye'nin Enerji Verimliliği 2030 Stratejisi ve II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular/T%C3%BCrkiyeninEnerjiVerimlili%C4%9Fi2030StratejisiVeIIUlusalEnerjiVerimlili%C4%9FiEylemPlan%C4%B1_202401161407.pdf (Erişim tarihi: 26.07.2025)
79. T.C. İSTANBUL BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ İMAR MÜDÜRLÜĞÜ (t.y.), BIM Ar-Ge Çalışmaları, İstanbul Büyükşehir Belediyesi İmar Müdürlüğü. <https://imarmudurlugu.ibb.istanbul/hizmetkategori/bim-ar-ge-calismalari> (Erişim tarihi: 11.08.2025)
80. T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI 2024, Türkiye'nin BIM Entegrasyonu Çalıştay Raporu. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihizmetler/icerikler/turk-ye-n-n-bim-entegrasyonu-calistay-raporu-20250716075438.pdf> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
81. MARKETS AND MARKETS 2025, Building Information Modeling Market Report. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/building-information-modeling-market-95037387.html> (Erişim tarihi: 26.07.2025)

82. MITERA-KIELBASA E., Zima K. 2024, BIM Policy Trends in Europe: Insights from a Multi-Stage Analysis, *Applied Sciences*, 14(11), 4363. <https://doi.org/10.3390/app14114363>
83. FEDERAL MINISTRY REPUBLIC OF AUSTRIA CLIMATE ACTION EEMI AND T. 2023, DPP4ALL – A Digital Product Passport for All, Federal Ministry Republic of Austria Climate Action EEMI and T., Vienna, Austria.
84. LEE G., Borrmann A. 2020, BIM Policy and Management, *Construction Management and Economics*, 38(5), 413–419. <https://doi.org/10.1080/01446193.2020.1726979>
85. MORRELL P. 2014, Adopt BIM or Be “Betamaxed Out”, *Building Design*. <https://www.bdonline.co.uk/adopt-bim-or-be-betamaxed-out-says-morrell/5018263.article> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
86. BIM TASK GROUP 2015, The Level-2 BIM Package. <https://bimuk.co.uk/standards/bim-level-2-documents> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
87. WILLIAMSON J. 2017, £5.4m to Launch “Centre for Digital Built Britain”, *The Manufacturer*. <https://www.themanufacturer.com/articles/5-4m-to-launch-centre-for-digital-built-britain/> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
88. UNICLASS 2015, Uniclass 2015 Classification System. <https://www.cpic.org.uk/uniclass> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
89. UK GOVERNMENT 2020, Transforming Infrastructure Performance: Roadmap to 2030. <https://www.gov.uk/government/publications/transforming-infrastructure-performance-roadmap-to-2030/transforming-infrastructure-performance-roadmap-to-2030> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
90. NOVATR 2023, BIM Projects in the UK. <https://www.novatr.com/blog/bim-projects-in-uk> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
91. NBS’ 10th National BIM Report, <https://www.thenbs.com/knowledge/national-bim-report-2020> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
92. VIENNA BUSINESS AGENCY 2021, Digital Planning, Construction and Operation – The Technology Report: Digitales Planen, Bauen und Betreiben – Technologie Report, Für die Stadt Wien, Vienna, Austria
93. DIGITAL AGENDA VIENNA 2019, – Vienna Becomes Digitization Capital: Digitale Agenda Wien 2025 – Wien wird Digitalisierungshauptstadt, Digital Agenda Vienna, Vienna, Austria.
94. FEDERAL MINISTRY REPUBLIC OF AUSTRIA Climate Action Environment, Energy, Mobility, Innovation And Technology; Federal Ministry Republic Of Austria Labour And Economy 2021, Artificial Intelligence Mission Austria 2030, Federal Ministry Republic of Austria Climate Action EEMI and T., Vienna, Austria.

95. EUROPEAN COMMISSION 2021, European Construction Sector Observatory: Country Profile Austria, Publication Office of the European Union, Brussels, Belgium
96. FEDERAL MINISTRY OF TRANSPORT AND DIGITAL INFRASTRUCTURE 2015, Road Map for Digital Design and Construction: Introduction of Modern, IT-Based Processes and Technologies for the Design, Construction and Operation of Assets in the Built Environment, Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, Berlin, Germany
97. REFORM COMMISSION FOR THE CONSTRUCTION OF MAJOR PROJECTS 2015, Action Plan for Major Projects, Bundesregierung, Berlin, Germany
98. DIRECTORATE GENERAL FOR WATERWAYS AND SHIPPING FEDERAL MINISTRY FOR DIGITAL AND TRANSPORT 2022, Implementation Strategy BIM-WSV2030, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Berlin, Germany
99. DEUTSCHE BAHN AG 2022, BIM Strategy Implementation of Building Information Modelling BIM in the Infrastructure Department of Deutsche Bahn AG, Deutschen Bahn AG, Berlin, Germany
100. FEDERAL MINISTRY OF THE INTERIOR AND COMMUNITY; FEDERAL MINISTRY OF DEFENCE, BUNDESBAU 2021, BIM Master Plan for Federal Buildings. Explanatory Report, Bundesbau, Berlin, Germany
101. ES.BIM COMMISSION (t.y.), The es. Bim Commission, <https://www.esbim.es/en/es-bim/la-comision/> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
102. CONSTRUTEC 2018, 2018 Is a Key Year for Implementing BIM in Spain, <http://www.construtec.ifema.es/en/2018-key-bim-spain/> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
103. BIM COMMUNITY 2019, The Implementation of BIM in Spain: Past, Present and Future, <https://www.bimcommunity.com/news/load/920/the-implementation-of-bim-in-spain-pastpresent-and-future> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
104. GOVERNMENT OF CATALONIA 2023, Government of Catalonia Agreement GOV/81/2023, Generalitat de Catalunya, Barcelona, Spain
105. GOVERNMENT OF SPAIN, Ministry Of Transport Mobility And Urban Agenda, Ministry Of Finance And Civil Service, BIM Interministerial Commission 2023, BIM Plan in Public Procurement, Government of Spain, Madrid, Spain
106. LE MONITEUR 2013, Le Conseil Régional de Bourgogne Gère Son Patrimoine Avec la Maquette Numérique, <https://www.lemoniteur.fr/article/le-conseil-regional-de-bourgogne-gere-son-patrimoine-avec-la-maquette-numerique.1036009> (Erişim tarihi: 12.08.2025)

107. DELCAMBRE B. 2014, Mission Numérique du Bâtiment. Rapport, Ministère du Logement de l'Égalité des Territoires et de la Ruralité, Paris, France. <http://www.batiment-numerique.fr/uploads/PDF/rapport-mission-numerique-batiment-vf.pdf> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
108. PTNB, 2015. Operational Roadmap. Plan Transition Numerique dans le Batiment, Paris, France. Retrieved from [http://www.batiment-numerique.fr/uploads/PDF/Feuille%20de%20route%20PTNB_EN_002%20\(1\).pdf](http://www.batiment-numerique.fr/uploads/PDF/Feuille%20de%20route%20PTNB_EN_002%20(1).pdf) (Erişim tarihi: 12.08.2025)
109. PTNB, 2016. Guide de recommandations à la maîtrise d'ouvrage. Plan Transition Numerique dans le Batiment, Paris, France. Retrieved from <http://www.batiment-numerique.fr/uploads/DOC/Guides%20et%20Etudes/PTNB%20-%20Guide%20Methodo%20MOA.pdf> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
110. PTNB, 2017. Stratégie française pour les actions de pré-normalisation et normalisation BIM appliquées au bâtiment, Plan Transition Numerique dans le Batiment, Paris, France. Retrieved from: http://www.batiment-numerique.fr/uploads/DOC/Normalisation/PTNB_Rapport%20final_FDR%20Normalisation_D%C3%A9cembre%202018.pdf (Erişim tarihi: 12.08.2025)
111. CMS (t.y.), *CMS Expert Guide to Building Information Modelling (BIM) – France*, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-building-information-modelling-bim/france> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
112. PANTELI C., Polycarpou K., Morsink-Georgalli F. Z., Stasiulienė L. 2020, Overview of BIM Integration into the Construction Sector in European Member States and European Union Acquis, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 410(1), 012073. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012073>
113. BIM COMMUNITY 2019, Julien Denormandie Presents the BIM 2022 Plan to Materialize the Digital Transformation in Construction, <https://www.bimcommunity.com/news/load/1028/julien-denormandie-presents-thebim-2022-plan-to-materialize-the-digital-transformation-in-construction> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
114. PLAN BIM 2022 <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/batiment-numerique> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
115. CHENG J. C., Lu Q. 2015, A Review of the Efforts and Roles of the Public Sector for BIM Adoption Worldwide, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 20(27), 442–478
116. GEOSPATIAL WORLD 2019, BIM Adoption Around the World: How Good Are We?, <https://www.geospatialworld.net/article/bim-adoption-around-the-world-how-good-are-we/> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
117. APROPLAN 2019, BIM Maturity, Best Practices and Trends in the Netherlands, <https://www.aproplan.com/blog/construction-collaboration/bim-maturity-best-practices-trends-netherlands> (Erişim tarihi: 12.08.2025)

118. HOBEIKA N., Van Liempt J., Noardo F., Ohori K. A., Stoter J. 2022, GeoBIM Information to Check Digital Building Permit Regulations, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B4-2022, 529–535
119. ITALY MINISTRY OF INFRASTRUCTURE AND TRANSPORT 2017, Ministerial Decree Number 560 of 01/12/2017, <http://www.mit.gov.it/normativa/decretoministeriale-numero-560-del-01122017> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
120. COBUILDER 2019, Italy Takes a Firm Stance in BIM Implementation, Issuing a Decree to Make It Mandatory in 2019, <https://cobuilder.com/en/bim-in-italy/> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
121. NORWAY GOVERNMENT 2025, National Geospatial Strategy Towards 2025, Regjeringen.no. https://www.regjeringen.no/contentassets/6e470654c95d411e8b1925849ec4918d/en-gb/pdfs/en_nasjonal_geodatastrategi.pdf (Erişim tarihi: 12.08.2025)
122. KLUCK M., Olsen H. B. 2015, Public Clients as a Driver for the Development of Open BIM Standards in Norway, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 20, 347–357. <https://www.itcon.org/paper/2015/27> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
123. STATSBYGG 2013, Statsbygg BIM Manual 1.2.1 (2013-12-17). https://dok.statsbygg.no/wp-content/uploads/2020/06/statsbyggs-bim-manual-1-2-1_en_20131217.pdf (Erişim tarihi: 12.08.2025)
124. BIM-WORLD.DE (t.y.), Norwegian Company with Ground-Breaking Technology Within the Viewing of All BIM Related Data, <https://www.bim-world.de/norwegian-company-with-ground-breaking-technology-within-the-viewing-of-all-bim-related-data> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
125. NOVORENDER (t.y.), Evolution of Norwegian Infra BIM, <https://novorender.com/evolution-of-norwegian-infra-bim/> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
126. MINISTRY OF CLIMATE 2024, Building Register User Environment, <https://livekluster.ehr.ee/ui/ehr/v1/> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
127. CIVITTA 2024, Report of Digitization of the Construction Sector, Civitta, Tartu, Estonia
128. MAA-AMET (t.y.), 3D Maa-amet Kaart, <https://3d.maaamet.ee/kaart/> (Erişim tarihi: 21.08.2025)
129. WONG A. K. D., Wong F. K., Nadeem A. 2009, Comparative Roles of Major Stakeholders for the Implementation of BIM in Various Countries, *Proceedings of the International Conference on Changing Roles: New Roles, New Challenges*, Noordwijk Aan Zee, The Netherlands, 5–9 October 2009, 5–9

130. BUILDINGSMART FINLAND 2012, Common BIM Requirements 2012, <https://buildingsmart.fi/en/common-bim-requirements-2012/> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
131. EDIRISINGHE R., London K. 2015, Comparative Analysis of International and National Level BIM Standardization Efforts and BIM Adoption, *Proceedings of the 32nd CIB W78 Conference*, Eindhoven, The Netherlands
132. BUILDINGSMART FINLAND 2015, Common InfraBIM Requirements YIV 2015, <https://buildingsmart.fi/en/infrabim-en/common-infrabim-requirements-yiv-2015/> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
133. KIRAHUB 2023, RAVA3pro (en), 17 Nisan 2023. <https://kirahub.org/en/rava3pro-en> (Erişim tarihi: 21.08.2025)
134. NASERY N. (ty.), LinkedIn Profil Sayfası, <https://www.linkedin.com/in/noman-nasery/recent-activity/all/> (Erişim tarihi: 20.08.2025)
135. NOVAPOINT 2019, Swedish Transport Administration Ready for BIM, <https://www.novapoint.com/swedishtransport-administration-ready-bim-0> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
136. BIM ALLIANCE 2019, About BIM Alliance, <https://www.bimalliance.se/om-oss/in-english/> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
137. DIGITAL SWISS (ty.), Strategie DCH, <https://digital.swiss/userdata/uploads/strategie-dch-en.pdf> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
138. BIMCONNECT (t.y.), Switzerland – Recent Facts, <https://bimconnect.org/en/switzerland/recent-facts/> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
139. CZECH MINISTRY OF INDUSTRY AND TRADE 2019, Concept of Introducing the BIM Method in the Czech Republic, <https://www.mpo.cz/en/construction-and-raw-materials/bim/concept-of-introducing-the-bimmethod-in-the-czech-republic---233659/> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
140. CUNECO – CENTRE FOR PRODUCTIVITY IN CONSTRUCTION (t.y.), Cuneco – Centre for Productivity in Construction, <http://cuneco.dk/english> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
141. AGENCY FOR ROADS AND TRAFFIC 2022, Business Plan AWV 2021–2022, Agency for Roads and Traffic, Brussels, Belgium
142. COUNCIL OF MINISTERS OF THE REPUBLIC OF BULGARIA 2020, Digital Transformation of Bulgaria for the Period 2020–2030, Council of Ministers of the Republic of Bulgaria, Sofia, Bulgaria
143. CROATIAN CHAMBER OF CIVIL ENGINEERS 2017, General Guidelines for the BIM Approach in Construction Project, Croatian Chamber of Civil Engineers, Zagreb, Croatia

144. YU J., Lee S. 2023, Comparative Study on BIM Acceptance Model by Adoption Period, *Buildings*, 13(6), 1450. <https://doi.org/10.3390/buildings13061450>
145. AUTODESK 2013, BIM Adoption Expands from 17% in 2007 to Over 70% in 2012, According to New McGraw-Hill Construction Report, *Autodesk News*. <https://adsknews.autodesk.com/en/stories/bim-adoption-expands-from-17-in-2007-to-over-70-in-2012-according-to-new-mcgraw-hill-construction-re/> (Erişim tarihi: 11.08.2025)
146. RISKUS J. 2023, More Small Firms Are Using BIM, *AIA Architect (Architect Magazine)*. https://www.architectmagazine.com/aia-architect/aianow/more-small-firms-are-using-bim_o (Erişim tarihi: 11.08.2025)
147. PLANRADAR 2024, BIM in the US: What the Data Says, *PlanRadar Blog*. <https://www.planradar.com/us/bim-in-the-us/> (Erişim tarihi: 11.08.2025)
148. U.S. GENERAL SERVICES ADMINISTRATION (GSA) 2024, 3D-4D Building Information Modeling, *GSA – Design and Construction*. <https://www.gsa.gov/real-estate/design-and-construction/3d4d-building-information-modeling> (Erişim tarihi: 11.08.2025)
149. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS – CAD/BIM TECHNOLOGY CENTER (t.y.), USACE BIM Object Library (UBOL), Engineer Research and Development Center, Information Technology Laboratory. <https://cadbimcenter.erd.c.dren.mil/default.aspx?p=a&t=1&i=114> (Erişim tarihi: 11.08.2025)
150. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS 2020, Engineering and Construction Bulletin No. 2020-9: BIM Object Library Released, *Engineering and Construction Bulletin*, Whole Building Design Guide (WBDG). <https://www.wbdg.org/dod/ecb/usace-ecb-2020-9> (Erişim tarihi: 11.08.2025)
151. NIBS (t.y.), About NBIMS, <https://nibs.org/nbims/about/> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
152. MARS BIM INTERNATIONAL (t.y.), USA Federal Building Project, <https://marsbiminternational.com/projects/usa-federal-building.html> (Erişim tarihi: 20.08.2025)
153. FHWA 2021, Advancing BIM for Infrastructure: National Strategic Roadmap, Federal Highway Administration (FHWA). <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/21064/index.cfm> (Erişim tarihi: 20.08.2025)
154. ROYAL ARCHITECTURAL INSTITUTE OF CANADA (RAIC) (t.y.), BIM Explained. https://raic.org/sites/raic.org/files/raic/documents/bim_explained.pdf (Erişim tarihi: 11.08.2025)
155. TATEYAMA K. 2017, A New Stage of Construction in Japan: i-Construction, *IPA Newsletter*, 2(2), 2–11

156. MLIT 2020, BIM Policy Document, <https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/content/001351970.pdf> (Erişim tarihi: 20.08.2025)
157. RUI Sucheng vd., 2025, A Mixed-Method Comparative Analysis of BIM Technology Adoption in China's and Japan's Construction Sectors, <https://doi.org/10.3390/buildings15132234>
158. NOVATR 2025, Japan's 8 Most Impressive BIM Buildings, <https://www.novatr.com/blog/bim-projects-in-japan> (Erişim tarihi: 22.08.2025)
159. CORENET (t.y.), Overview of CORENET X, <https://info.corenet.gov.sg/overview/about-corenet-x/overview-of-corenet-x> (Erişim tarihi: 21.08.2025)
160. XIE Mingjing vd., 2022, Policies, applications, barriers and future trends of building information modeling technolog
161. 14. Beş Yıllık İnşaat Sektörü Gelişim Planı, <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/27/5670687/files/12d50c613b344165afb21bc596a190fc.pdf> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
162. Kentsel-Kırsal İnşaat Karbon Zirvesi Uygulama Planı, 2022, <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/13/5700752/files/679a410848f04ea6bd2034faea9d4839.pdf> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
163. JI DONGHOON, TURKAN Yelda, 2021, Analyzing the Impact of Government-driven BIM Adoption: Introducing the Case of South Korea, <https://www.iaarc.org/publications/fulltext/131%20ISARC%202021%20Paper186.pdf> (Erişim tarihi: 12.08.2025)
164. KIM Inhan vd., 2020, Development of K-BIM e-Submission prototypical system for the openBIM-based building permit framework, <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.13756>
165. HOOD, G., 2015. Bringing BIM Compliance to the UAE. The CAD Room. 29 Eylül 2015, <https://www.thecadroom.com/blog/bim-compliance-in-the-uae> (Erişim tarihi: 16.08.2025)
166. TMT. (2017). BIM law and regulation in the United Arab Emirates. CMS - Law, Tax, Future. 30 Haziran 2017, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-buildinginformation-modelling-bim/united-arab-emirates> (Erişim tarihi: 16.08.2025)
167. BUDDEN R. 2019, A New BIM Strategy for Dubai, *Esri Blog*, 25 Eylül 2019. <https://blog.mg-aec.com/a-new-bim-strategy-for-dubai> (Erişim tarihi: 11.08.2025)
168. BUILDINGSMART INTERNATIONAL 2025, IFC Mandate 2025, https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2025/03/IFC-Mandate_2025.pdf (Erişim tarihi: 16.08.2025)

169. LAAKSO M., Kiviniemi A. 2012, The IFC Standard – A Review of History, Development, and Standardization, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, May 2012. <http://www.itcon.org/2012/9> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
170. KANG T., 2018, Development of a Conceptual Mapping Standard to Link Building and Geospatial Information, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7, 162. <https://doi.org/10.3390/ijgi7050162>
171. YU Y., Kim S., Jeon H., Koo B. 2023, A Systematic Review of the Trends and Advances in IFC Schema Extensions for BIM Interoperability, *Applied Sciences*, 13(23), 12560. <https://doi.org/10.3390/app132312560>
172. BUILDINGSMART (t.y.), IFC4.3 Documentation, <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/> (Erişim tarihi: 16.08.2025)
173. BUILDINGSMART SPAIN 2024, The Evolution of IFC: The Path to IFC5, <https://www.buildingsmart.es/2024/12/03/the-evolution-of-ifc-the-path-to-ifc5/> (Erişim tarihi: 09.07.2025)
174. LIU X.*, Wang X., Wright G., Cheng J. C. P., Li X., Liu R., 2017, A State-Of-The-Art Review On The Integration Of Building Information Modeling (BIM) And Geographic Information System (CBS), *ISPRS International Journal Of Geo-Information*, 6(2), 53
175. AEC Magazine (2023). Breaking Down the IFC 4.3 Schema. <https://aecmag.com/collaboration/breaking-down-the-ifc-4-3-schema/> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
176. BUILDINGSMART INTERNATIONAL (t.y.), IFC 4.3 Documentation – Chapter5, <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/chapter-5/> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
177. BUILDINGSMART INTERNATIONAL (t.y.), IFC 4.3 Documentation – Chapter 6, <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/chapter-6/> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
178. BUILDINGSMART INTERNATIONAL (t.y.), IFC 4.3 Documentation – Chapter 7, <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/chapter-7/> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
179. DEMİR ALTINTAŞ Y., 2020, A Method For CBS And BIM Integration To Support Automated Zoning Code Compliance Checking, Doktora Tezi, İzmir Institute of Technology, Mimarlık Anabilim Dalı, İzmir.
180. BENNING P., Dumoulin C. 2023, Building Information Modeling: Shared Modeling, Mutual Data, the New Art of Building by Mechanics, Civil Engineering and Construction; Interoperability Through Standards: IFC, Concepts and Methods, Google Books,

- <https://books.google.com.tr/books?id=q1XrEAAAQBAJ> (Erişim tarihi: 09.07.2025)
181. BUILDINGSMART INTERNATIONAL (t.y.), IFC4.2 Schema – IfcKernel Content,
https://standards.buildingsmart.org/IFC/DEV/IFC4_2/FINAL/HTML/schema/ifckernel/content.htm (Erişim tarihi: 26.07.2025)
 182. VONTHRON A., Koch C., König M. 2018, Removing Duplicated Geometries in IFC Models Using Rigid Body Transformation Estimation and Flyweight Design Pattern, Visualization in Engineering, 6, 2. <https://doi.org/10.1186/s40327-018-0061-x>
 183. LI H., Liu H., Liu Y., Wang Y. 2016, An Object-Relational IFC Storage Model Based on Oracle Database, ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B2, 625–631. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B2-625-2016>
 184. ZHU J., Wu P., Anumba C. 2021, A Semantics-Based Approach for Simplifying IFC Building Models to Facilitate the Use of BIM Models in GIS, *Remote Sensing*, 13(22), 4727. <https://doi.org/10.3390/rs13224727>
 185. OHORI K. A., Diakit  A. A., Krijnen T., Ledoux H., Stoter J. 2022, Representing and Exchanging Semantic 3D City Models with CityJSON, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(3), 175
 186. WIKIPEDIA (2025), Industry Foundation Classes, *Wikipedia* (İngilizce). https://en.wikipedia.org/wiki/Industry_Foundation_Classes (Erişim tarihi: 16.08.2025)
 187. WIX J. 2005, *Information Delivery Manual: Guide to Components and Development Methods*.
https://standards.buildingsmart.org/documents/IDM/IDM_guide-CompsAndDevMethods-IDMC_004-v1_2.pdf (Erişim tarihi: 16.08.2025)
 188. SEE R., Karlsh j J., Davis D. 2012, *An Integrated Process for Delivering IFC Based Data Exchange*.
https://standards.buildingsmart.org/documents/IDM/IDM_guide-IntegratedProcess-2012_09.pdf (Erişim tarihi: 16.08.2025)
 189. CLEMEN C., G rne H. 2019, Level of Georeferencing (LoGeoRef) Using IFC for BIM, *Journal of Geodesy, Cartography and Cadastre*, ISSN: 1454-1408, Mart 2019.
 190. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) 2020, *ISO 19650-1:2018 – Organization and Digitization of Information About Buildings and Civil Engineering Works, Including Building Information Modelling (BIM) — Information Management Using Building Information Modelling — Part 1: Concepts and Principles*.
<https://www.iso.org/standard/74039.html> (Erişim tarihi: 26.07.2025)

191. GRÖGER G., Plümer L. 2012, CityGML – Interoperable Semantic 3D City Models, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71 (Temmuz 2012). <https://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004>
192. KUTZNER T., Hijazi I., Kolbe T. H. 2018, Semantic Modelling of 3D Multi-Utility Networks for Urban Analyses and Simulations – The CityGML Utility Network ADE, *International Journal of 3-D Information Modeling (IJ3DIM)*, 7(2), 1–34. <https://dx.doi.org/10.4018/IJ3DIM.2018040101>
193. KUTZNER T., Chaturvedi K., Kolbe T. H. 2020, CityGML 3.0: New Functions Open Up New Applications, *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88, 43–61. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00095-z>
194. OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM (OGC) (t.y.), CityGML Standard, <https://www.ogc.org/standards/citygml/> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
195. BILJECKI F., Kumar K., Nagel C. 2018, CityGML Application Domain Extension (ADE): Overview of Developments, *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3, 13. <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0055-6>
196. EDOUX H., Arroyo Ohori K., Kumar K. vd. 2019, CityJSON: A Compact and Easy-to-Use Encoding of the CityGML Data Model, *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4, 4. <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0064-0>
197. LÖWNER M. O., Gröger G., Benner J., Biljecki F., Nagel C. 2016, Proposal for a New LOD and Multi-Representation Concept for CityGML, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W1, 3–12
198. 3D CITY DATABASE (t.y.), Geometry and Topology UML Model (Version 4.1), <https://3dcitydb-docs.readthedocs.io/en/release-v4.1/3dcitydb/uml/geometry-topology.html> (Erişim tarihi: 26.07.2025)
199. OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM (OGC) 2023, Built Environment Data Standards and Their Integration: An Analysis of IFC, CityGML and LandInfra, <https://www.ogc.org/standards/infragml/> (Erişim tarihi: 09.07.2025)
200. KUMAR K., Labetski A., Ohori K. vd. 2019, The LandInfra Standard and Its Role in Solving the BIM-GIS Quagmire, *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4, 5. <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0065-z>
201. LIU X., Wang X., Wright G., Cheng J. C. P., Li X., Liu R. 2017, A State-of-the-Art Review on the Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS), *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(2), 53. <https://doi.org/10.3390/ijgi6020053>
202. YAU N.-J., Tsai M.-K., Yulita E. N. 2014, Improving Efficiency for Post-Disaster Transitional Housing in Indonesia: An Exploratory Case Study, *Disaster Prevention and Management*, 23, 157–174
203. STANTON-CHAPMAN T. L., Chapman D. A. 2011, Using GIS to Investigate the Role of Recreation and Leisure Activities in the Prevention of Emotional and

Behavioral Disorders, *International Review of Research in Mental Retardation: Developmental Epidemiology, Mental Retardation and Developmental Disabilities*, 33, 191–211

204. LIU X., Shannon J., Voun H., Truijens M., Chi H.-L., Wang X. 2014, Spatial and Temporal Analysis on the Distribution of Active Radio-Frequency Identification (RFID) Tracking Accuracy with the Kriging Method, *Sensors*, 14, 20451
205. EL-MEKAWY M., Östman A., Hijazi I. 2012, An Evaluation of IFC–CityGML Unidirectional Conversion, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 3(5), 159–171. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2012.030525>
206. TAYLOR J. E., Bernstein P. G. 2009, Paradigm Trajectories of Building Information Modeling Practice in Project Networks, *Journal of Management in Engineering*, 25, 69–76
207. GEO WEEK NEWS 2024, The Growing Partnership between Esri and Autodesk, <https://www.geoweeknews.com/news/the-growing-partnership-between-esri-and-autodesk> (Erişim tarihi: 09.07.2025)
208. PIRAS G., Muzi F., Zylka C. 2024, Integration of BIM and GIS for the Digitization of the Built Environment, *Applied Sciences*, 14(23), 11171. <https://doi.org/10.3390/app142311171>
209. ROMANO G., Mancini F. 2022, Transformation of a Historical Building into a Nearly Zero Energy Building (nZEB), *Journal of Physics: Conference Series*, 2385, 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2385/1/012008>
210. LAMAGNA M., Groppi D., Nezhad M. M., Piras G. 2021, A Comprehensive Review on Digital Twins for Smart Energy Management System, *International Journal of Energy Production and Management*, 6, 323–334. <https://doi.org/10.2495/EQ-V6-N4-323-334>
211. LIU R., Zhong Y., 2021, Analysis of BIM and GIS Integration: Results from Literature Review and Questionnaire, Master in Product Development with a Specialization in Sustainable Building.
212. XIE Y., Wang M., Liu X., Wu Y. 2017, Integration of GIS and Moving Objects in Surveillance Video, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(4), 94. <https://doi.org/10.3390/ijgi6040094>
213. SANI M., Rahman A. 2018, GIS and BIM Integration at Data Level: A Review, *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W9, 299–306. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-299-2018>
214. KANG T. W., Hong C. H. 2015, A Study on Software Architecture for Effective BIM/GIS-Based Facility Management Data Integration, *Automation in Construction*, 54, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.019>

215. MA Z., Ren Y. 2017, Integrated Application of BIM and GIS: An Overview, *Procedia Engineering*, 196 (Haziran), 1072–1079. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.064>
216. Araya-Santelices P., Moraga P., Atencio E., Lozano-Galant F., Lozano-Galant J. A. 2025, BIM-GIS-Based Approach for Quality Management Aligned with ISO 9001, *Applied Sciences*, 15(11), 6107. <https://doi.org/10.3390/app15116107>
217. AWE M., Malhi A., Budka M., Mavengere N., Dave B. 2025, Towards 4D BIM: A Systematic Literature Review on Challenges, Strategies and Tools in Leveraging AI with BIM, *Buildings*, 15(7), 1072. <https://doi.org/10.3390/buildings15071072>
218. GISPEOPLE (t.y.), Enhancing Engineering Projects with the Integration of BIM and GIS, <https://www.gispeople.com.au/enhancing-engineering-projects-with-the-integration-of-bim-and-gis> (Erişim tarihi: 11.08.2025)
219. VISILEAN (t.y.), BIM and GIS Integration in Metro Construction, <https://visilean.com/blog/bim-and-gis-integration-in-metro-construction> (Erişim tarihi: 11.08.2025)
220. MUHAMMAD R., Nasir A. R. 2022, Integrating BIM in Construction Dispute Resolution: Development of a Contractual Framework, *Buildings*, 12(11), 1828. <https://doi.org/10.3390/buildings12111828>
221. ESRI (t.y.), InfoTech's Appia Combines Construction Contract Data with ArcGIS, *ArcNews*. <https://www.esri.com/about/newsroom/arcnews/infotechs-appia-combines-construction-contract-data-with-arcgis> (Erişim tarihi: 11.08.2025)
222. PISHDAD P., Onungwa I. O. 2024, Analysis of 5D BIM for Cost Estimation, Cost Control and Payments, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 29, 525–548. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.024>
223. HOSAMO H. H., Rolfsen C. N., Zeka F., Sandbeck S., Said S., Sætre M. A. 2024, Navigating the Adoption of 5D Building Information Modeling: Insights from Norway, *Infrastructures*, 9(4), 75. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9040075>
224. ESRI (t.y.), GIS-BIM Integration Report, <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/ebooks/gis-bim-integration-report.pdf> (Erişim tarihi: 11.08.2025)
225. ISHN. How BIM Technology Improves Health and Safety on Construction Sites. *Industrial Safety & Hygiene News (ISHN)*. Erişim: <https://www.ishn.com/articles/113807-how-bim-technology-improves-health-and-safety-on-construction-sites> (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025)
226. INFOTECH (t.y.). Benefits of GIS in Construction. Erişim: <https://www.infotechinc.com/benefits-of-gis-in-construction> (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025)

227. GIM INTERNATIONAL 2020, Combining BIM and GIS in Building Operation and Information Management. Erişim: <https://www.gim-international.com/content/article/combining-bim-and-gis-in-building-operation-and-information-management> (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025)
228. ZHU J., Wang X., Chen M., Wu P., Kim M. 2019, Integration of BIM and GIS: IFC Geometry Transformation to Shapefile Using Enhanced Open-Source Approach, *Automation in Construction*, 106, 102859. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102859>
229. BOGUSLAWSKI P., Zlatanova S., Gotlib D., Wyszomirski M., Gnat M., Grzempowski P. 2022, 3D Building Interior Modelling for Navigation in Emergency Response Applications, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, 103066
230. LIU J., Luo J., Hou J., Wen D., Feng G., Zhang X. 2020, A BIM-Based Hybrid 3D Indoor Map Model for Indoor Positioning and Navigation, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 747
231. PEREIRA V., Santos J., Leite F., Escórcio P. 2021, Using BIM to Improve Building Energy Efficiency – A Scientometric and Systematic Review, *Energy and Buildings*, 250, 111292. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111292>
232. ZHU J., Wright G., Wang J., Wang X. 2018, A Critical Review of the Integration of Geographic Information System and Building Information Modelling at the Data Level, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(2), 66. <https://doi.org/10.3390/ijgi7020066>
233. ZHU J., Wu P. 2022, BIM/GIS Data Integration from the Perspective of Information Flow, *Automation in Construction*, 136, 104166. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104166>
234. SYED ABDUL RAHMAN S. A. F., Abdul Maulud K. N. 2019, Approaching BIM-GIS Integration for 3D Evacuation Planning Requirement Using Multipatch Geometry Data Format, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 385, 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/385/1/012033>
235. ZHU J., Wu P. 2021, A Common Approach to Geo-Referencing Building Models in Industry Foundation Classes for BIM/GIS Integration, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(6), 362. <https://doi.org/10.3390/ijgi10060362>
236. ZHU J., Wang X., Wang P., Wu Z., Kim M. J. 2019, Integration of BIM and GIS: Geometry from IFC to Shapefile Using Open-Source Technology, *Automation in Construction*, 102, 105–119
237. TEKER Samet, 2023, Presesyon ve Nutasyon Hareketinin Eci – Ecef Dönüşümüne Etkisinin İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
238. KORKMAZ Özlem, BASARANER Melih, 2024, Ontology Based Integration of BIM and GIS for the Representation of Architectural, Structural and

- Functional Elements of Buildings, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-4/W11-2024, 19th 3D GeoInfo Conference, 1–3 Temmuz 2024, Vigo, İspanya, s. 635–642.
239. BUILDINGSMART AUSTRALASIA, 2020, User Guide for Geo-referencing in IFC, Version 2.0, buildingSMART International. Erişim: <https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/02/User-Guide-for-Geo-referencing-in-IFC-v2.0.pdf> (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025).
 240. AMIREBRAHIMI S., RAJABIFARD A., MENDIS P., NGO T., 2016, A BIM-GIS Integration Method in Support of the Assessment and 3D Visualisation of Flood Damage to a Building, *Journal of Spatial Science*, 61(2), s. 317–350. <https://doi.org/10.1080/14498596.2016.1189365>
 241. TAN Y., LIANG Y., ZHU J., 2023, CityGML in the Integration of BIM and the GIS: Challenges and Opportunities, *Buildings*, 13(7), 1758. <https://doi.org/10.3390/buildings13071758>
 242. SANI M.J., MUSLIMAN I.A., ABDUL RAHMAN A., 2022, IFC to CityGML Conversion Algorithm Based on Geometry and Semantic Mapping, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-4/W3-2021, s. 287–293. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W3-2021-287-2022>
 243. IRIZARRY J., KARAN E.P., JALAEI F., 2013, Integrating BIM and GIS to Improve the Visual Monitoring of Construction Supply Chain Management, *Automation in Construction*, 31, s. 241–254. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.005>.
 244. ADOUANE Kamel, STOUFFS Rudi, JANSSEN Patrick, DOMER Bernd, 2019, A Model-Based Approach to Convert a Building BIM-IFC Data Set Model into CityGML, *Journal of Spatial Science*, 65, s. 1–24. <https://doi.org/10.1080/14498596.2019.1658650>
 245. NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE, 2019, IFC2CityGML: Strict and Automatic Mapping of IFC–BIM Models into Semantically Enriched 3D CityGML Building Models. Erişim: <https://ifc2citygml.github.io/> (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025)
 246. NAGEL Claus, KOLBE Thomas, t.y., Conversion of IFC to CityGML, ResearchGate. Erişim: https://www.researchgate.net/publication/266298548_Conversion_of_IFC_to_CityGML (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025)
 247. ECK D.J., t.y., Introduction to Computer Graphics, çevrimiçi kitap. Erişim: <http://math.hws.edu/graphicsbook/> (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025)
 248. ISO. 2021, ISO 19166 — Geographic Information — Conceptual Mapping between BIM and GIS. <https://www.iso.org/standard/78899.html>
 249. TÜRKİYE BÜYÜK MİLLET MECLİSİ, 2012, 6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun. Erişim:

- <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=6306&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5> (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025)
250. AYDIN D., 2016, Kentsel Dönüşüm Sürecinde Halkın Katılımı: Türkiye ve İngiltere Örneği, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 8(15), s. 51–70. Erişim: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/395685> (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025)
 251. ANADOLU AJANSI, 2023, İstanbul'daki 1,5 Milyon Riskli Konut İçin “Güçlendirme veya Dönüşümde Acele Edin” Uyarısı, 15 Ağustos 2023. Erişim: <https://www.aa.com.tr/tr/gundem/istanbuldaki-1-5-milyon-riskli-konut-icin-guclendirme-veya-donusumde-acele-edin-uyarisi/3547110> (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025).
 252. T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI, 2024, “Yarısı Bizden” Kampanyasında Destek Tutarları Artırıldı, 15 Mayıs 2024. Erişim: <https://csb.gov.tr/yarisi-bizden-kampanyasinda-destek-tutarlari-artirildi-bakanlik-faaliyetleri-41622> (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025).
 253. T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI, 2023, Yeniden Daha Güçlü Anadolu Hızla İnşa Ediliyor, 18 Temmuz 2023. Erişim: <https://www.csb.gov.tr/yeniden-daha-guclu-anadolu-hizla-insa-ediliyor-bakanlik-faaliyetleri-40395> (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025).
 254. NTV, 2024, Deprem Yaraları Sarılıyor: 201 Bin Konut Teslim Edildi, 6 Şubat 2024. Erişim: <https://www.ntv.com.tr/turkiye/depremin-yaralari-sariliyor201-bin-konut-teslim-edildi,9KzlCyGTZ0i-jJ-lze2zyg> (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025).
 255. T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI, t.y., Binalarda Enerji Verimliliği, Çevresel Göstergeler. Erişim: <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/binalarda-enerji-verimliliği-i-85813> (Erişim tarihi: 11 Ağustos 2025).
 256. WU L., LENG J., 2025, An Overview of Sustainable Urban Regeneration Development: A Synergistic Perspective of CIM and BIM, Buildings, 15(5), 833. <https://doi.org/10.3390/buildings15050833>
 257. WANG J., MA Y., LI R., ZHANG S., 2025, Applications of Building Information Modeling (BIM) and BIM-Related Technologies for Sustainable Risk and Disaster Management in Buildings A Meta-Analysis (2014–2024), Buildings, 15(13), 2289.
 258. AKBARI S., 2024, Sustainability and Building Information Modelling, Automation in Construction, 159, 105109.
 259. LOPEZ-BERGES-ALVAREZ I., 2024, A Systematic Review of BIM-Based Life Cycle Sustainability Assessment Integration (BIM-LCSA) (makale). Sustainability, 16(24), 11070.
 - MENTEŞE E. Y., 2023, Future Exposure Modelling for Risk-Informed Decision

260. GEOWEEK NEWS, 2022, How BIM Helps to Create a More Disaster-Resilient World. Erişim: <https://www.geoweeeknews.com/news/how-bim-helps-to-create-a-more-disaster-resilient-world> (Erişim tarihi: 2 Ağustos 2025).
261. SUCCAR Bilal, JALAEI Farzad, RAZAVI ALAVI Seyed Reza, 2025, BIM Maturity at Scale: Enabling Digital Transformation Across the Canadian Construction Industry, National Research Council Canada, ISBN: 978-0-660-77134-2. <https://doi.org/10.4224/40003493>
262. HASHIM N. (vd.), 2024, Assessing Cost and Benefit Attributes of Building Information Modelling (BIM) Implementation in Malaysian Public Agency: PLS-SEM Approach, Journal of Information Technology in Construction, 29, 308–323.
263. PAIDI P., SHARMA K. V., 2024, A Case Study on BIM-Enabled Clash Detection in a G+13 Residential Building, IEEE Conference on Engineering Informatics (ICEI).
264. KOCAKAYA M. N., CELİK Y., GİRAN Ö., TÜRKAKİN O. H., 2025, BIM Cost Management: ROI on BIM Implemented Projects in the Construction Industry, Proceedings of the 7th International Symposium on Innovation in Architecture, Planning and Design, Gaziantep, 119–125.
265. BRINKMANN CONSTRUCTORS, 2025, How Data-Driven Models Improve Safety, Cost, Coordination and Logistics Construction Projects, Brinkmann Constructors. Erişim: <https://brinkmannconstructors.com/news/how-data-driven-models-improve-safety-cost-coordination-and-logistics-construction-projects> (Erişim tarihi: 19 Ağustos 2025).
266. REVIZTO, 2025, BIM for Facility Management: Definition, Benefits and How..., Revizto. Erişim: <https://revizto.com/en/bim-for-facility-management/> (Erişim tarihi: 5 Ağustos 2025).
267. DAS Karan, KHURSHEED Salman, PAUL Virendra Kumar, 2025, The Impact of BIM on Project Time and Cost: Insights from Case Studies, Discover Materials, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00200-2>
268. DODGE DATA & ANALYTICS, 2015, Measuring the Impact of BIM on Complex Buildings, SmartMarket Report, McGraw-Hill Construction, New York.
269. ZHAN Y., PENG Y., XIONG C., 2025, Application of BIM in Renovation Design of Existing Buildings, In: HE G., WU L., LENG J. (Eds.), An Overview of Sustainable Urban Regeneration Development: A Synergistic Perspective of CIM and BIM, Buildings, 15(5), 833, <https://doi.org/10.3390/buildings15050833>.
270. DATTA S. D., TAYEH B. A., HAKEEM I. Y., ABU AISHEH Y. I., 2023, Benefits and Barriers of Implementing Building Information Modeling Techniques for Sustainable Practices in the Construction Industry – A Comprehensive Review, Sustainability, 15(16), 12466, <https://doi.org/10.3390/su151612466>.

271. MANZOOR B. vd., 2021, Strategies for Adopting Building Information Modeling (BIM) in Sustainable Building Projects – A Case of Malaysia, *Buildings*, 11, 249, <https://doi.org/10.3390/buildings11070249>
272. ROSEN M. A., KISHAWY H. A., 2012, Sustainable Manufacturing and Design: Concepts, Practices and Needs, *Sustainability*, 4, 154–174, <https://doi.org/10.3390/su4010154>.
273. SHAREEF S. L., ALTAN H., 2016, Building Sustainability Rating Systems in the Middle East, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 170, 283–293,
274. HWANG B. G., TAN J. S., 2012, Green Building Project Management: Obstacles and Solutions for Sustainable Development, *Sustainable Development*, 20, 335–349, <https://doi.org/10.1002/sd.492>.
275. LUO Z., CAO Y., TIAN H., HU X., LU M., XIE J., 2023, Research on the Calculation Method of Life Cycle Carbon Emission of Architectural Landscape Gardening Project – Taking Residential District in Xi'an as an Example, *Building Science*, 39, 9–18.
276. ALWAN Z., GREENWOOD D., GLEDSON B., 2015, Rapid LEED Evaluation Performed with BIM-Based Sustainability Analysis on a Virtual Construction Project, *Construction Innovation*, 15, 134–150, <https://doi.org/10.1108/CI-01-2014-0002>.
277. AKADIRI P. O., OLOMOLAIYE P. O., CHINYIO E. A., 2013, Multi-Criteria Evaluation Model for the Selection of Sustainable Materials for Building Projects, *Automation in Construction*, 30, 113–125, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.004>.
278. LIU S., MENG X., TAM C., 2015, Building Information Modeling Based Building Design Optimization for Sustainability, *Energy and Buildings*, 105, 139–153, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.037>
279. GOURLIS G., KOVACIC I., 2017, Building Information Modelling for Analysis of Energy Efficient Industrial Buildings – A Case Study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 953–963, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.081>.
280. RADZI A.R., AZMI N.F., KAMARUZZAMAN S.N., ALGAHTANY M., RAHMAN R.A., 2024, Challenges in Construction Readiness for BIM-Based Building Projects, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 24(3), s. 1689–1704. <https://doi.org/10.1080/13467581.2024.2343803>
281. AKKOYUNLU T., 2015, Kentsel Dönüşüm Projeleri İçin BIM Uygulama Planı Önerisi, Doktora Tezi, Ekim 2015
282. CAO Y., XU C., AZIZ N. M., KAMARUZZAMAN S. N., 2023, BIM–GIS Integrated Utilization in Urban Disaster Management: The Contributions, Challenges, and Future Directions, *Remote Sensing*, 15(5), 1331, <https://doi.org/10.3390/rs15051331>.

283. TEO T. A., CHO K. H., 2016, BIM-Oriented Indoor Network Model for Indoor and Outdoor Combined Route Planning, *Advanced Engineering Informatics*, 30, 268–282, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.03.002>
284. TASHAKKORI H., RAJABIFARD A., KALANTARI M., 2015, A New 3D Indoor/Outdoor Spatial Model for Indoor Emergency Response Facilitation, *Building and Environment*, 89, s. 170–182.
285. OKTAVIANUS A., CHEN P.H., LIN J., CHANG L.M., 2024, Optimizing Post-Earthquake Building Recovery Management: A Synergistic Approach Using BIM, *Computer Vision, and GIS*
286. MIGNARD C., NICOLLE C., 2014, Merging BIM and GIS Using Ontologies: Application to Urban Facility Management in ACTIVE3D, *Computers in Industry*, 65, s. 1276–1290. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.07.008>
287. VAN HERBRUGGEN B., FONTAINE J., POORTER E. D., 2021, Anchor Pair Selection for Error Correction in Time Difference of Arrival (TDoA) Ultra Wideband (UWB) Positioning Systems, In: *Proceedings of the 2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Lloret de Mar, Spain, 29 November–2 December 2021, IEEE, 1–8.
288. HUANG J., LUO H., SHAO W., ZHAO F., YAN S., 2020, Accurate and Robust Floor Positioning in Complex Indoor Environments, *Sensors*, 20, 2698, <https://doi.org/10.3390/s20092698>.
289. LYU H.-M., SHEN S.-L., ZHOU A., YANG J., 2019, Perspectives for Flood Risk Assessment and Management for Mega-City Metro System, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 84, s. 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.10.019>
290. BAARIMAH A.O., ALALOUL W.S., LIEW M.S., KARTIKA W., AL-SHARAFI M.A., MUSARAT M.A., ALAWAG A.M., QURESHI A.H., 2021, A Bibliometric Analysis and Review of Building Information Modelling for Post-Disaster Reconstruction, *Sustainability*, 14(1), 393. <https://doi.org/10.3390/su14010393>
291. XU Z., ZHANG H., LU X., XU Y., ZHANG Z., LI Y., 2019, A Prediction Method of Building Seismic Loss Based on BIM and FEMA P-58, *Automation in Construction*, 102, s. 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.017>
292. RAD M.A.H., JALAEI F., GOLPOUR A., VARZANDE S.S.H., GUEST G., 2021, BIM-Based Approach to Conduct Life Cycle Cost Analysis of Resilient Buildings at the Conceptual Stage, *Automation in Construction*, 123, 103480. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103480>
293. RAMÍREZ EUDADE R., FERREIRA T.M., 2021, On the Suitability of a Unified GIS-BIM-HBIM Framework for Cataloguing and Assessing Vulnerability in Historic Urban Landscapes: A Critical Review, *International Journal of Geographical Information Science*, 35(10), s. 2047–2077. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1869745>

294. ZOU Y., GONZALEZ V., LIM J., AMOR R., GUO B., BABAEIAN JELODAR M., 2019, Systematic Framework for Postearthquake Bridge Inspection through UAV and 3D BIM Reconstruction, Proceedings of the CIB World Building Congress, Hong Kong, Çin, 17–21.
295. MESSAOUDI M., NAWARI N.O., 2020, BIM-Based Virtual Permitting Framework (VPF) for Post-Disaster Recovery and Rebuilding in the State of Florida, International Journal of Disaster Risk Reduction, 42, 101349. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101349>
296. ASSEM A., ABDELMOHSEN S., EZZELDIN M., 2019, Smart Management of the Reconstruction Process of Post-Conflict Cities, ARCH, 14, s. 325–343. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1238852>
297. AMIREBRAHIMI S., RAJABIFARD A., MENDIS P., NGO T., 2015, A Framework for a Microscale Flood Damage Assessment and Visualization for a Building Using BIM–GIS Integration, International Journal of Digital Earth, 9(4), s. 363–386. <https://doi.org/10.1080/17538947.2015.1034201>
298. PARK E. S., SEO H. C., 2021, Risk Analysis for Earthquake-Damaged Buildings Using Point Cloud and BIM Data: A Case Study of the Daeseong Apartment Complex in Pohang, South Korea, Sustainability, 13(2), 456, <https://doi.org/10.3390/su13020456>.
299. IŞIKDAĞ U., UNDERWOOD J., AOUAD G., 2008, An Investigation into the Applicability of Building Information Models in Geospatial Environment in Support of Site Selection and Fire Response Management Processes, Advanced Engineering Informatics, 22(4), s. 504–519. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2008.06.001>
300. CHEN L.-C., WU C.-H., SHEN T.-S., CHOU C.-C., 2014, The Application of Geometric Network Models and Building Information Models in Geospatial Environments for Fire-Fighting Simulations, Computers, Environment and Urban Systems, 45, s. 1–12.
301. BI Tianping, WANG Peiwen, ZHANG Qiang, 2018, Design and Implementation of Digital Fire Control System Based on BIM and 3D GIS, Proceedings of the 2017 3rd International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM 2017), January 2018. <https://doi.org/10.2991/ifeesm-17.2018.327>
302. ATYABI S., KIAVARZ MOGHADDAM M., RAJABIFARD A., 2019, Optimization of Emergency Evacuation in Fire Building by Integrated BIM and GIS, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W15, s. 131–139. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W15-131-2019>
303. WEHBE R., SHAHRUR I., 2021, A BIM-Based Smart System for Fire Evacuation, Future Internet, 13(9), 221, <https://doi.org/10.3390/fi13090221>

ETİK KURALLARINA UYGUNLUK BEYANI

Uzmanlık tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, bunlardan her seferinde değinme yaparak yararlandığımı ve Coğrafi Bilgi Sistemi Uzmanlığı Yönetmeliğine uygun olarak hazırladığımı belirtir, bunu onurumla doğrularım.

evre, şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

25/08/2025

Esra ÇINAREL KARAPAÇA

ÖZGEÇMİŞ

1995 yılında Ankara’da doğdu. 2019 yılında Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geomatik Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2022 yılında Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından ilan edilen Coğrafi Bilgi Sistemi Uzman Yardımcılığı yarışma sınavını başarıyla kazanarak göreve başladı. 2025 yılında Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda tezli yüksek lisans eğitimine başlamış olup öğrenimine devam etmektedir. Halen Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü’nde Coğrafi Bilgi Sistemi Uzman Yardımcısı olarak görevini sürdürmektedir.