

## Yapı Bilgi Modellemesi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Entegrasyonu için IFC'den CityGML ve CityJSON Veri Formatlarına Dönüşümün İncelenmesi

Özlem Korkmaz<sup>1,\*</sup>, Melih Başaraner<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Harita Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

### Makale Tarihçesi

Gönderim: 23.08.2023

Kabul: 20.09.2023

Yayın: 20.12.2023

### Araştırma Makalesi

**Öz** – Yapı bilgi modellemesi (YBM) ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) entegrasyonu; yapı ve tesis planlama ve yönetimi, akıllı şehirler ve mekânsal dijital ikiz gibi uygulamalar için kritik öneme sahiptir. YBM, yapı yaşam döngüsü boyunca zengin geometrik ve semantik bilgilere sahipken, CBS; mekânsal modelleme, analiz ve görselleştirme yetenekleri sağlar. Bu nedenle, YBM ve CBS iç ve dış mekân bağlamında birbirini tamamlayan temel sistemlerdir. Öte yandan, uygulama odakları, mekânsal kapsamlar, koordinat sistemleri, semantik ve geometrik temsiller ve ayrıntı düzeyleri açısından farklılıklara sahip olmaları, bu iki sistemin entegrasyonunda zorluklar meydana getirmektedir. Entegrasyon için veri düzeyinde geometrik dönüşüm ve semantik aktarım yapılmalıdır. YBM verileri için genel olarak endüstri temel sınıfları (IFC), CBS verileri için ise CityGML, CityJSON veya shape dosyası formatı kullanılmaktadır. Entegrasyon için bazı teknikler ve teknolojiler mevcut olsa da halen çözülmemiş sorunlar mevcuttur. Bu nedenle, YBM ve CBS entegrasyonu ve veri değişim formatları aktif araştırma konusu olmaya devam etmektedir. CityJSON'ın kent modellerini 3B temsil etmek için kullanılan yeni bir veri standardı olması nedeniyle veri değişimi için uygulanmasına yönelik çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca, CityGML'in hafif versiyonu olarak oluşturulan CityJSON'ın uygulamalarda CityGML'den farkı merak konusudur. Bu çalışmada, IFC formatındaki üç farklı yapıya ait YBM veri seti, semantik aktarım ve geometrik dönüşüm ile Safe FME Workbench yazılımı kullanılarak CityGML ve CityJSON formatlarına dönüştürülmüştür. Bu bağlamda, YBM'den CBS'ye dönüşüm incelenmiş ve CityGML ile CityJSON veri değişim formatları ile elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler** – Yapı bilgi modellemesi, coğrafi bilgi sistemleri, veri entegrasyonu, semantik aktarım, geometrik dönüşüm

## An Investigation of Conversion from IFC to CityGML and CityJSON Data Formats for Building Information Modeling and Geographic Information Systems Integration

<sup>1,2</sup> Department of Geomatic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Yıldız Technical University, Istanbul, Türkiye

### Article History

Received: 23.08.2023

Accepted: 20.09.2023

Published: 20.12.2023

### Research Article

**Abstract** – The integration of building information modeling (BIM) and geographic information systems (GIS) is critical for applications such as construction and facility planning and management, smart cities and spatial digital twin. While BIM has rich geometric and semantic information throughout the building lifecycle, GIS provides spatial modeling, analysis, and visualization capabilities. Therefore, BIM and GIS are fundamental systems that complement each other in the context of indoor and outdoor spaces. On the other hand, the differences in application focus, spatial scopes, coordinate systems, semantic and geometric representations and levels of detail create challenges in the integration of these two systems. Industry foundation classes (IFC) are generally used for BIM data, and CityGML, CityJSON or shape file formats are used for GIS data. For BIM data, IFC are generally used, while for GIS data, CityGML, CityJSON, or shapefile formats are employed. Moreover, the distinction between CityJSON, developed as a light version of CityGML, and its implementation in applications compared to CityGML is a subject of interest. In this study, BIM datasets of three different structures in IFC format are converted into CityGML and CityJSON formats through semantic transfer and geometric transformation with FME Workbench software. In this context, the conversion from BIM to GIS is investigated, and obtained findings are evaluated by comparing the CityGML and CityJSON data exchange formats.

**Keywords** – Building information modeling, geographic information systems, data integration, semantic transfer, geometric transformation

<sup>1</sup> okorkmaz@yildiz.edu.tr

<sup>2</sup> mbasaran@yildiz.edu.tr

\*Sorumlu Yazar

## 1. Giriş

Son yıllarda yapı bilgi modellemesi (YBM), coğrafi bilgi sistemleri (CBS), sanal/artırılmış gerçeklik (VR/AR) ve nesnelerin interneti (IOT) gibi bilgi ve iletişim teknolojilerinde yaşanan gelişmelerle birlikte, akıllı şehirler, dijital ikiz ve yapıların yaşam döngülerinin yönetimi gibi uygulamalar üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır (Sulaiman, Liu, Binalhaj, Al-Kasasbeh, ve Abudayyeh, 2021). Bu uygulamalar için YBM ve CBS, temel sistemler olarak kullanılmaktadır. YBM ve CBS entegrasyonu, YBM'deki bina modellerinin görselleştirme ve analiz için bir CBS ortamına entegre edilmesini gerektiren akıllı şehir ve mekânsal dijital ikiz için temel bir tekniktir (Xia, Liu, Efremochkina, Liu, ve Lin, 2022; Zhu ve Wu, 2021a). Bu amaçla, YBM verilerinin CBS tarafından erişilen bir biçime/formata dönüştürülmesi gerekir (Zhu vd., 2021a). YBM ve CBS entegrasyonu, bina yaşam döngüsü yönetiminin her aşamasında çevrenin binaya ve binanın çevreye etkilerinin anlaşılmasına katkı sağlar. Böylelikle, bina yaşam döngüsünde bulunan fizibilite, planlama, inşaat, operasyon ve bakım aşamalarında sürdürülebilir kararların alınması, uygulama takviminin geliştirilmesi, belirli bir konumdaki inşaat maliyetinin belirlenmesi ve bina performans analizleri daha kolay hale gelmektedir (Bansal, 2021). Bina yaşam döngüsünde; tadilat, güçlendirme ve yenileme tesis yönetiminin önemli bileşenleridir (Wong, Ge, ve He, 2018). YBM teknolojisi, paydaşlar arasındaki iletişimi geliştirmek için binalar ile ilgili bilgileri içeren üç boyutlu (3B) bir bina modeli sağlarken; CBS, bina çevresiyle ilgili bilgilerin analizi ile mekânsal verilerden yararlanarak tesis yönetimindeki çalışmaları kolaylaştırır (Sulaiman vd., 2021). YBM ve CBS entegrasyonu, acil durum yönetimi gibi iç mekân uygulamaları (örneğin, bir yangın durumunda yönlendirme ve tahliye yollarını bulma) (Isikdag, Underwood, Aouad, ve Troud, 2007; Chen, Wu, Shen, ve Chou, 2014) etkin enerji (Niu, Pan, ve Zhao, 2015) ve çevre yönetimi (Zhao, Liu, ve Mbachu, 2019; Wang, Deng, Won, ve Cheng, 2019), kesintisiz navigasyon (Teo ve Cho, 2016) gibi iç ve dış mekân bağlantısı gerektiren servisler (Kang, 2018) gibi pek çok uygulamada kullanılabilir.

YBM, 3B nesne tabanlı bir modellemedir. Nesnelere parametrelerle (örneğin, yükseklik ve derinlik) ve kuralarla (örneğin, bir duvar yüksekliği azaltılırsa, çatı konumunun otomatik olarak değişmesi) temsil ederek özelliklerle birlikte geometri oluşturmaya olanak sağlar (Bolpagni, 2022). CBS, yeryüzündeki veya yakınındaki mekânsal olarak tanımlanabilen nesnelerin ve olayların modellenmesi, analizi ve sunumu için bilgisayar tabanlı bir araçtır. CBS teknolojisi, sorgu ve istatistiksel analiz gibi yaygın veri tabanı işlemlerini haritaların sunduğu benzersiz mekânsal görselleştirme ve analiz avantajlarıyla bütünleştirir (Longley, 2008; Longley, Goodchild, Maguire, ve Rhind, 2015). YBM, yapıyı çevreleyen mekândan bağımsız lokal bir koordinat sistemi kullanırken; CBS, doğrudan ya da dolaylı olarak bir coğrafi koordinat sisteminde tanımlı olup yapının çevresiyle bağlantı sağlayan bir köprü niteliğindedir (Bansal, 2021). Öte yandan, YBM ve CBS'de farklı kavramsal veri modelleri ve formatları kullanıldığı için veri alışverişinde problemler meydana gelmektedir (Zhu vd., 2021a). YBM ve CBS entegrasyonu, iki metodoloji arasındaki ayrıntı düzeyleri, geometrik temsil yöntemleri, arşivleme yöntemleri ve semantik içerik açısından farklılıklar nedeniyle karmaşıktır (Vacca ve Quaquero, 2020). Bu amaca yönelik olarak literatürde birçok çalışma mevcuttur. Genellikle YBM'den CBS'ye veri dönüşümü yapılsa da CBS'den YBM'ye, YBM ve CBS'nin üçüncü bir sisteme aktarılması biçiminde üç farklı entegrasyon yapılabilmektedir (Ma ve Ren, 2017; Zhu ve Wu, 2022).

YBM/CBS veri dönüşümü yapılırken YBM verileri için endüstri temel sınıfları (industry foundation classes - IFC), 3B CBS verileri için ise CityGML, CityJSON (Ohuri, Ledoux, ve Peters, 2022a) ve shape dosyası formatı kullanılmaktadır (Zhu vd., 2022). IFC; buildingSMART tarafından mimarlık, mühendislik ve inşaat (AEC) uygulama alanı içinde bilgi alışverişi için oluşturulan birincil açık veri şemasıdır (Herle, Becker, Wollenberg, ve Blankenbach, 2020). CityGML ise OGC tarafından genişletilebilir işaretleme dili (XML) formatında tanımlanan coğrafya işaretleme dili (GML)'ne dayalı olarak şehirlerin ve çevresinin 3B modellerini depolama kapasitesine sahip açık standartlı bir veri modeli ve değişim formatıdır (Sani ve Rahman, 2018). YBM, geometrik ve semantik verilerden oluşmaktadır. Geometri; nesnelerin şekli, büyüklüğü ve konumu hakkında veri sağlarken, semantik ise sınıf türü, materyal ve işlevler gibi özellikler hakkında veri sağlar. Bu nedenle YBM ve CBS arasındaki dönüşüm, geometrik dönüşümün yanında semantik aktarımı da içermelidir (Zhu vd., 2021a). İki sistem arasındaki geometrik dönüşüm, örneğin FME (Adouane, Stouffs, Janssen, ve Domer, 2020), BIMServer ve FME üzerine kurulu ArcGIS'in bir uzantısı olan Data Interoperability (DI) gibi bazı ticari yazılım paketleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Fakat bu araçların hiçbiri hem geometrik hem semantik verileri bütünüyle başarılı bir biçimde dönüştüremez (Sani vd., 2018). Bu nedenle yeni yöntemlere ihtiyaç vardır. Son dönemde, YBM ve CBS entegrasyonu için semantik web teknolojileri ve kaynak tanımlama çerçevesini (resource description framework - RDF) esas alan entegre mekânsal bilgi modeli (IGIM) yaklaşımı kullanılmıştır (Hor, Jadidi, ve Sohn, 2016). Ayrıca araştırmacılar, YBM ve CBS'nin birlikte çalışabilirliğini desteklemek

için çeşitli veri alışverişi formatları geliştirmiştir. IFG (IFC for GIS) veri modeli ve buildingSMART veri sözlüğü (bSDD), YBM'nin CBS gibi diğer mühendislik uygulama alanlarıyla entegrasyonuna yönelik çalışmalara örnektir. IFG'nin amacı, tek bir veri türünü içe veya dışa aktararak bina ve CBS verilerinin alışverişini sağlamaktır. Fakat, bina ve coğrafi bilgilerin temsili için birçok heterojen sınıf vardır. Bu nedenle, hem bina hem de CBS sınıfları için farklı bir birlikte çalışabilirlik formatı uygulamak daha mantıklıdır (Karan, Irizarry, ve Haymaker, 2015). bSDD, bir veri sözlüğü olmanın yanı sıra, sınıflandırmaları ve onların özelliklerini, izin verilen değerleri, birimleri ve çevirileri barındıran çevrimiçi bir servistir. bSDD, veri kalitesini ve bilgi tutarlılığını garanti etmek için standartlaştırılmış bir iş akışı sağlayarak veri tabanı içindeki tüm içerik arasında bağlantı kurulmasına olanak tanır (Costin, Ouellette, ve Beetz, 2023).

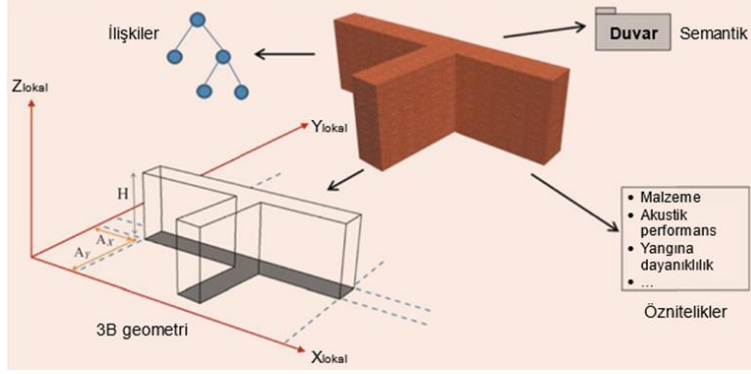
Yukarıda belirtildiği üzere, YBM ve CBS entegrasyonunun eksiksiz biçimde gerçekleştirilmesinin önünde halen çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Bu amaçla, IFC'den CityGML'e dönüşüm için bazı yazılımlar kullanılsa da özellikle 3B kent modellemeye yönelik görece yeni bir format olan CityJSON ile ilgili yeterli bir değerlendirme mevcut değildir. Buradan hareketle, bu makalede mevcut teknolojiler ile IFC'den gerek CityGML'e gerekse CityJSON'a geometrik dönüşüm ve semantik aktarımı üç farklı bina örneğinde gerçekleştirilmekte ve elde edilen bulgular irdelenmektedir. Böylece, YBM ve CBS entegrasyonuna yönelik yaygın ve yeni formatlara dayalı karşılaştırmalı bir performans değerlendirmesi ortaya konarak gelecek çalışmalara ışık tutulması amaçlanmaktadır.

### 1.1. Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)

Bilgisayar destekli tasarım (CAD) tabanlı, genellikle 2B klasik yaklaşımın yerini, semantik açıdan zengin, 3B nesne yönelimli YBM almıştır. YBM'nin modelleme paradigması, CAD yaklaşımından farklı olarak, nesne yönelimli bir yöntem ve semantik veri modellemesine dayanmaktadır. YBM; veri depolamanın, veri alışverişinin ve süreçlerin aşamalı olarak sayısallaştırılmasını içerir. YBM; semantik, (fiziksel, işlevsel, teknik ve betimleyici) öznitelikler, 3B geometri ve diğer yapı elemanlarıyla ilişkiler gibi çeşitli özelliklere sahip bina nesnesi veya bina bileşenlerini (örneğin, duvar, kiriş ve kolon) içerir (Şekil 1). Zaman, maliyet planları veya belgeler gibi diğer veriler de bileşenlerde saklanabilir. Böylece, bileşen odaklı modellere dayalı olarak, malzeme listelerinin oluşturulması, maliyet planlaması veya kütle/hacim hesaplamaları gibi çeşitli analizler ve simülasyonlar mümkün hale gelir (Blankenbach ve Becker, 2022).

YBM; binalardaki duvarlar, döşemeler, merdivenler, borular, kablolar, elektrik fişleri vb. sayısal tanımları olan (Casini, 2022) bir dizi nesnenin kombinasyonundan oluşan ayrıntılı nesne modeline sahip bina modellerine odaklanmaktadır. Her nesne, genellikle fiziksel görünümü tanımlayan 3B geometri, malzeme türleri, tahmin edilen kullanım ömrü, modeldeki diğer bileşenlerle ilişkileri, boyutları ve üreticinin verileri gibi bilgileri raporlayarak tanımlayan ve sınıflandıran verilere sahiptir. Bu nedenle duvar, kolon, pencere veya kapı gibi nesnelerin YBM'de bir anlamı vardır (Kolbe ve Donaubauer, 2021). YBM, tüm geometrik ve işlevsel öznitelikler de dahil olmak üzere semantik olarak zengin bilgileri akıllı nesnelere koleksiyonunda bütünleştirir (Bansal, 2021). Böylece, bir kez tanımlanan nesnenin birden çok modele yerleştirilmesi mümkün olur. Ayrıca nesnelere değiştirilmesiyle, her bir model otomatik olarak güncellenmektedir. Otomatik olarak modelin güncellenmesi hataları azaltmaktadır. Manuel müdahalelere ek olarak, parametre olarak bilinen bir dizi önceden programlanmış kural veya algoritma da mevcuttur. Örneğin, duvarların zemin seviyesinden başlayıp tavana ulaşmasını sağlamak için bir kural oluşturulabilir, bu durumda tavan yüksekliği (zeminden tavana olan yükseklik) değiştirildiğinde duvarlar otomatik olarak buna göre ayarlanacaktır (Casini, 2022). YBM, bina bilgilerini dinamik olarak alan, sunan ve ilişkisel veri tabanı kullanan bir yazılım aracıdır (Lawrence, Darwich, ve Means, 2018).

CBS, bir bilgi sisteminin tüm özelliklerine sahip bir mekânsal karar destek sistemidir. Planlama, yönetim, depolama ve problem çözümü için geometrik ve semantik verilerin elde edilmesini, modellenmesini, düzenlenmesini, analizini, sunumunu ve yönetimini sağlamaktadır. CBS ile diğer bilgi sistemleri arasındaki en büyük fark, CBS verilerinin coğrafi referanslı olmasıdır. CBS'nin temel ögesi; konum bilgisi ve bu konumla ilgili diğer tüm öznitelikleri içeren mekânsal bilgilerdir (Löwner, Gröger, Benner, Biljecki, ve Nagel, 2016). Mekânsal bilgiler, kavramsal model aracılığıyla gerçekliği temsil eder ve normal olarak koordinatları, mekânsal ilişkileri, öznitelikleri ve daha geniş kapsamda zaman ve metaveri bileşenlerini içerir (Liu vd., 2017).



Şekil 1. YBM için semantik veri modelleme (Blankenbach vd., 2022)

## 1.2. YBM ve CBS Farklılıkları

YBM ve CBS, sırasıyla mimari ve coğrafi mekâna ilişkin sayısal temsilleri sağlasa da odak noktaları farklı olan iki sistemdir. YBM, binalara odaklanırken, CBS binaların çevresindeki mekânsal bilgilere odaklanmaktadır. YBM, inşaat projelerine ve nispeten mikro düzeyde veri oluşturan bina iç bileşenlerine önem verirken, CBS, topografik harita örneğinde olduğu gibi daha çok makro düzeyde bilgiler üretmek için kullanılır (Wang, Pan, ve Luo, 2019). YBM'nin mekânsal kapsamı nispeten küçüktür (Longley, 2008). Bu nedenle, nesnelere genellikle bağıl olarak konumlandırılarak (Zhu vd., 2022) lokal düzlemsel (kartezyen) koordinat sisteminde aşamalı biçimde oluşturulmaktadır (Longley, 2008; Zhu vd., 2022). Aksine, CBS genellikle bölgesel, ulusal veya global olarak coğrafi mekândaki doğal ve yapay varlıkları (olguları), 2B veya 3B olarak modeller. Bu nedenle, dünyanın elipsoidal şekli dikkate alınarak (Longley, 2008) her bir nesne, coğrafi (örn. WGS84) ya da projeksiyon (harita) koordinat sisteminde (örn. GK (TM) Orta Meridyen 30°/TUREF) mutlak olarak konumlandırılır (Adouane vd., 2020).

YBM, hiyerarşik bir veri modelini esas alırken (Karan vd., 2015; Noardo vd., 2021); CBS, ilişkisel ya da nesne-ilişkisel veri tabanına dayalıdır (Karan vd., 2015). 3B katı modellerde nesnelere temsilleri, sınır temsili (boundary representation - B-rep), süpürerek katı model oluşturma (sweep solid - SS) ya da yapıcı katı geometri (constructive solid geometry - CSG) teknikleriyle oluşturulabilir. YBM, bu üç tekniği de destekleyen IFC formatında olsa da genellikle CSG ve SS temsillerini kullanmaktadır (Zhu vd., 2022). CBS ise B-rep ve yüzey modellerini kullanır (Ma vd., 2017). Kısaca; uygulama odakları, kullanıcılar, gelişim aşamaları, mekânsal ölçekler ve kapsamlar, koordinat sistemleri, semantik ve geometrik temsiller, ayrıntı düzeyleri, bilgi depolama ve erişim yöntemleri açısından farklılıklar olduğu için iki sistem arasında uyumsuzluklar meydana gelmektedir (Liu vd., 2017). Uyumsuzluklarına rağmen bu iki sistem birbirlerine veri sağlayarak birbirlerini tamamladıkları için entegre edilmeleri önemlidir (Demir Altıntaş ve İlal, 2022).

## 1.3. Veri Değişim Formatları

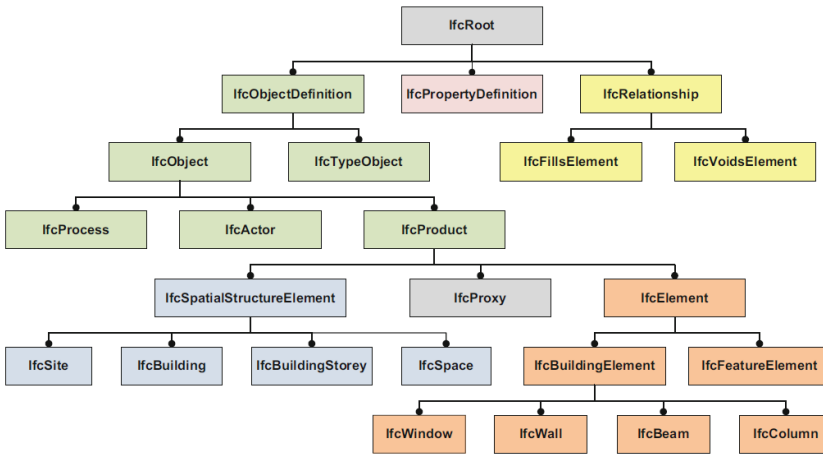
YBM ve CBS entegrasyonu için bazı veri değişim formatları mevcuttur. Bu değişim formatları; açık, tarafsız bir değişim formatı olan IFC (Zhu, Wang, Wang, Wu, ve Kim, 2019) ve semantik 3B kent modellerinin depolanması ve değişimi için temel açık veri modeli ve formatı olan CityGML'dir (Biljecki, Kumar, ve Nagel, 2018). YBM için genel veri formatı; AEC uygulama alanındaki yapı ve inşaat faaliyetlerini tanımlayan ve bilgi alışverişini sağlayan, açık, tarafsız ve nesne tabanlı bir veri formatı olan IFC'dir. Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO 16739:2013) tarafından tescil edilmiş resmi uluslararası standarttır. CBS'de, CityGML, JSON türevi CityJSON ve shape dosyası olmak üzere veri formatları mevcuttur. CityGML ağırlıklı olarak teorik çalışmalarda yer almakla birlikte, shape dosyası daha çok uygulamaya yönelik çalışmalarda kullanılmaktadır (Zhu vd., 2019). Shape dosyası, YBM ve CBS entegrasyonunda en sık kullanılan CBS platformu ArcGIS'in yerel bir formatıdır, topluma açıktır ve QGIS gibi birçok açık kaynaklı yazılım tarafından desteklenir (Zhu vd., 2021a).

### 1.3.1. IFC

IFC, binanın yaşam döngüsü boyunca karmaşık iletişim ve bilgi paylaşım süreçlerini yönetmek için bina projelerinde kullanılan standartlaştırılmış bir açık veri modelidir. IFC, genellikle daha küçük çaplı bina ve

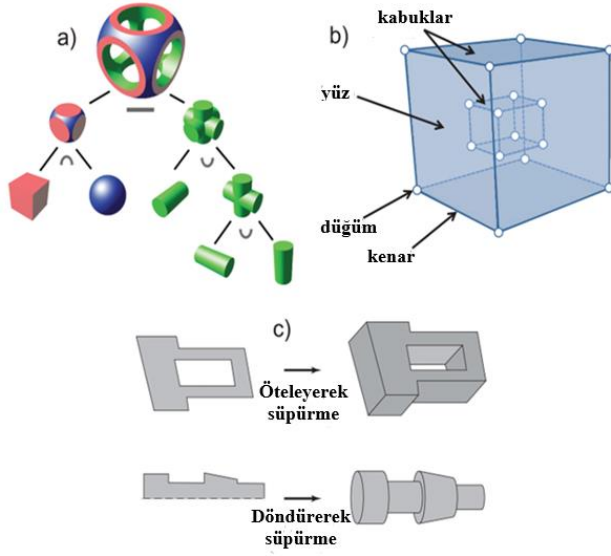
altyapı bileşenlerinin (mekanik, elektrik ve sıhhi tesisat bileşenleri) ve bu bileşenlere ilişkin ağ verilerinin yüksek geometrik ve semantik ayrıntıyla modellenmesine yönelik olarak tasarlanmıştır (Donkers, Ledoux, Zhao, ve Stoter, 2016). IFC, çeşitli disiplinler için ilgili yapıları, inşaat alanıyla ilgili kullanımları ve süreçleri, tipik yapı elemanlarının semantik tanımını, geometrik temsilini ve ilişkilerini içermektedir (Noardo vd., 2021).

IFC, buildingSMART tarafından geliştirilen EXPRESS tabanlı bir veri standardıdır. AEC uygulama alanları içinde açık ve tarafsız bir değişim formatıdır (Zhu vd., 2019). IFC; kaynak katmanı, çekirdek katmanı, birlikte çalışabilirlik katmanı ve uygulama alanı katmanı olmak üzere dört temel kavramsal katman içerir. Her IFC katmanı birkaç alt şema içermektedir (Rajabifard, Atazadeh, ve Kalantari, 2019). IFC dosyasında semantik; varlıkların, özneliklerin ve ilişkilerin bir karışımı olarak depolanır. Varlıkların (sınıfların) bir kısmı IfcBuildingElement'in alt varlıkları (IfcColumn, IfcBeam vb.) olarak tutulmaktadır. Bu varlıklar, bir binanın sahip olabileceği birçok farklı işlevi temsil etmek için kullanılabilir. Ancak bu bilgiyi sağlamayan, yaygın olarak genel işlev için kullanılan IfcBuildingElementProxy sınıfı da mevcuttur. Dağıtım elemanları (ör. ısıtma, soğutma, havalandırma ve sıhhi tesisat) gibi standardın diğer bölümlerinde de benzer alt sınıflar mevcuttur. IFC modelinde yer almayan nesnelerin temsilleri için IfcProduct'ın alt sınıfı olan IfcProxy ögesi mevcuttur. Bu tür genel sınıfların olması, özelleştirilmiş nesnelerin modellere eklenmesini desteklemek için kullanışlı olsa da nesnelerin yorumlanmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca, aynı türden bir nesneyi birkaç varlık aracılığıyla depolamak çoğu zaman mümkündür. IfcProduct ise üst soyu olan IfcObject, IfcObjectDefinition ve çekirdek katmanındaki en üst varlık olan IfcRoot'u içermektedir (Rajabifard vd., 2019; Ohori, Ledoux, ve Peters, 2022b) (Şekil 2).



Şekil 2. IFC sınıf hiyerarşisinin IfcBuildingElement içeren bir kısmı (Borrmann, Beetz, Koch, Liebich ve Murnic, 2018)

IFC'de, 3B katı modellerde nesnelerin temsil edilebilmesi için, B-rep, SS ya da CSG teknikleri kullanılmaktadır (Donkers vd., 2016; Zhu vd., 2019; Zhu vd., 2022). B-rep, sınırlayıcı yüzeyleri kullanan bir 3B nesneyi temsil eder (Şekil 3a). Genellikle pencereler ve kapılar gibi karmaşık nesneler için kullanılır. CSG, 3B nesneleri temsil etmek için ilkel nesnelere ilişkin bir dizi mantıksal (boolean) işlemin (fark, birleşim ve kesişim) sonucunu kullanır. İlkel nesneler; küreler, koniler, piramitler veya silindireler olabilir (Şekil 3b). SS, süpürme yolu ile bağlantılı olarak bir 3B geometriyi tanımlamak için bir 2B profil (daire, dikdörtgen ve çokgen) kullanır (Şekil 3c) (Donkers vd., 2016; Zhu vd., 2019). Bu temsiller bağımsız olarak kullanılabilir veya bir hiyerarşide birbirleriyle birleştirilebilir. Çıkarma ilişkileri, boşluk mekanizması yoluyla açıklıkları temsil eden IfcOpenings ve IfcSpaces önemlidir. IfcOpening, bir geometriden (örneğin, IfcWall'daki bir pencere için veya IfcSlab'daki bir merdiven için bir boşluk oluşturulması) çıkarılan 3B nesneleri tanımlar (Ohori vd., 2022b).



Şekil 3. IFC’de kullanılan katı model örnekleri: (a) İlk nesnelere mantıksal işlemler sonucu oluşturulan CSG, (b) yüzeyler kullanılarak oluşturulan B-rep ve (c) 2B profillerin süpürme işlemleri sonucu oluşan SS (Rajabifard vd., 2019)

YBM’deki LOD (Level Of Development) (Bkz. Bölüm 2.2.3.), hem gerekli olan geometrik ayrıntıyı hem de gerekli semantik bilgileri sağlayarak, bilgilerin kapsamını tanımlar (Casini, 2022). Bu iki kavram birlikte geliştirildikleri için genellikle uyumlu hale gelirler (Alhusban, 2021). Genel olarak; LOD100, binanın şeklini temsil eden tek bir bloktan oluşabilir. Ayrıca LOD100, yalnızca alan ve hacim gibi temel ölçümler için uygundur. LOD200, kirişlerin gerçek boyutlarını doğru biçimde temsil eder. LOD300’de nesnelere daha ayrıntılı ve doğrudur. LOD400, nesnelere küçük ayrıntıların eklenmesiyle onların en doğru temsillerini sağlar (Ingram, 2020). LOD500 ise sahada mevcut olan durumu yansıtmaktadır (Casini, 2022) (Şekil 4).

LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 400	LOD 500
Kavramsal	Yaklaşık geometri	Hassas geometri	İmalat	Gerçekleşen proje

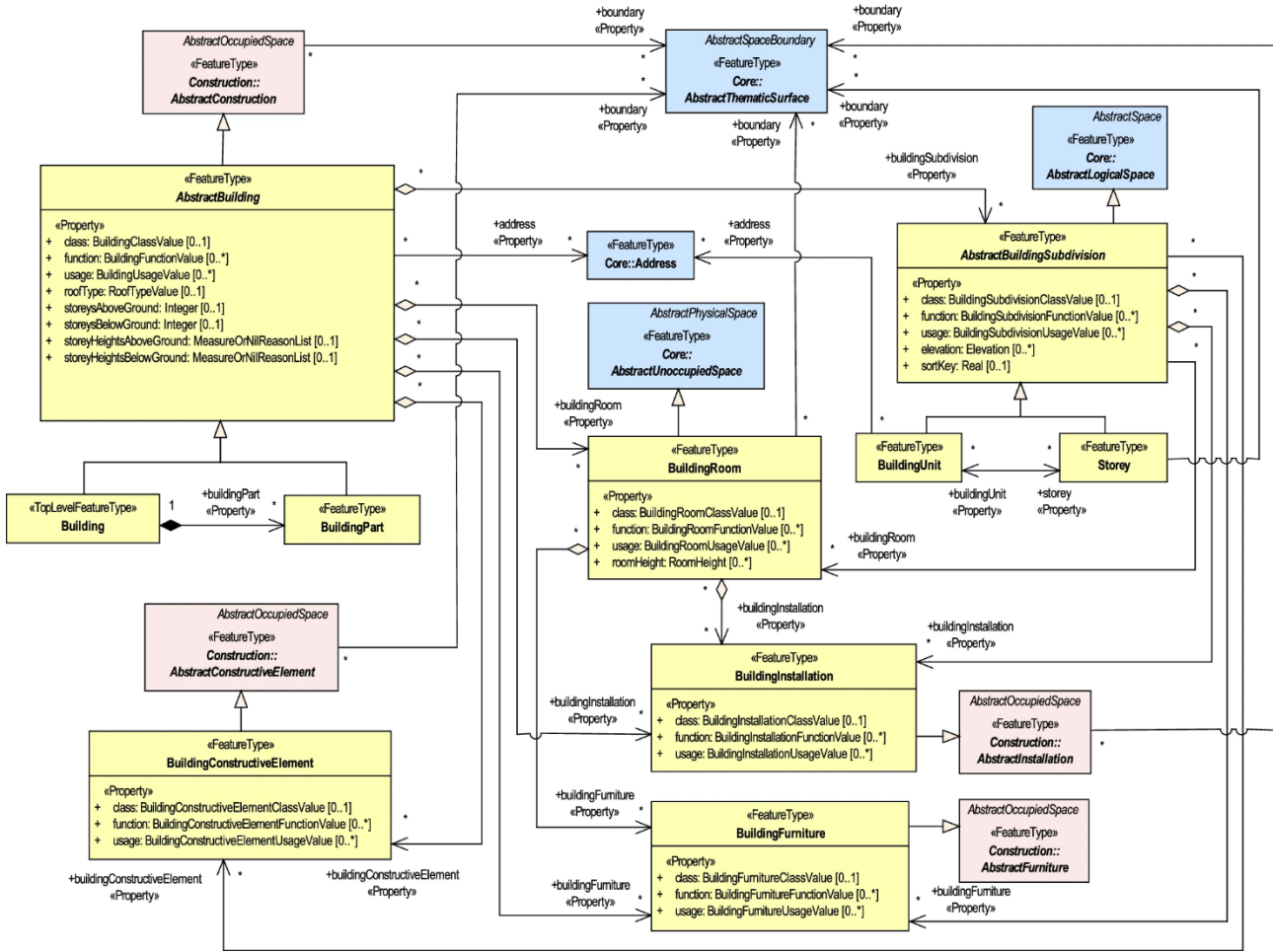
Şekil 4. Aynı varlığın LOD100-500 arası gelişim düzeyi değişimi (Blankenbach vd., 2022)

### 1.3.2. CityGML

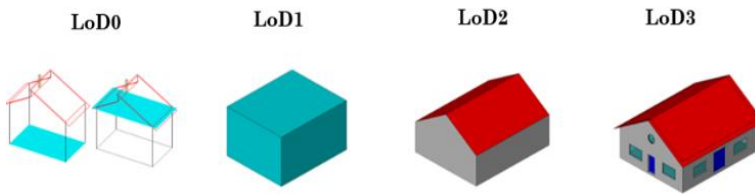
CityGML, OGC tarafından XML formatında tanımlanan GML’ye dayalı olarak kentlerin ve çevresinin 3B modellerini depolayabilen açık standart bir veri modeli ve değişim formatıdır (Sani vd., 2018). CityGML; binalar, yollar, demiryolları, tüneller, köprüler, su kütleleri, bitki örtüsü ve arazi gibi kentsel alandaki varlıklar için kavramsal bir şema tanımlar (Yao vd., 2018). CityGML’nin avantajı, elektrik dağıtımı veya tüketimi, trafik, gürültü ve kirliliğin yayılması gibi çeşitli olguları simüle etmek için bir şehri modelleyebilmesidir (Kolbe vd., 2021). CityGML’de semantik ve geometrik/topolojik özniteliklerle modelleme desteklenir (Al Kalbani ve Rahman, 2022). Semantik düzeyde; binalar, duvarlar, pencereler veya odalar gibi nesnelere ile temsil edilir. Tanımlamalar aynı zamanda nesnelere ilişkin öznitelikleri ve nesnelere arasındaki ilişkileri ve birleştirme (parça-bütün) hiyerarşilerini de içerir (Şekil 5). Geometrik düzeyde; geometri, mekânsal konumu ve kapsamı temsil eden tematik nesnelere atanır. Karmaşık geometriler, temel geometrilerden birleştirme hiyerarşisiyle oluşturulabilir (Kolbe vd., 2021). CityGML, 3B nesnelere geometrisini temsil etmek için iki kısıtlamayla ISO19107’nin bir alt kümesini kullanır: GM\_Curves yalnızca doğrusal olabilir (bu nedenle yalnızca

LineStrings ve LinearRings kullanılmış) ve GM\_Surfaces yalnızca düzlemsel olabilir (bu nedenle Polygons kullanılır) (Ohori vd., 2022a).

CityGML 3.0 veri formatında, mekânsal nesnelerin geometrik ayrıntılarının tanımlanmasına göre düşükten yükseğe dört farklı LoD (Level of Detail) (Bkz. Bölüm 2.2.3.) mevcuttur. LoD0, düzlemsel (2B) temsilleri; LoD1, prizmatik blok model temsilleri; LoD2, genelleştirilmiş geometrik temsilleri ve LoD3, en yüksek geometrik karmaşıklıkta temsilleri kapsar. LoD0'dan LoD3'e kadar olan tanımlar, ilkesel olarak önceki CityGML sürümleriyle aynıdır, ancak tüm nesne türlerini kapsayacak biçimde genişletilmiştir. Dış ve iç mekân nesneleri ve tüm öznitelikler, LoD0'dan LoD3'e kadar temsil edilebilir hale getirilmiştir. Bu nedenle önceki CityGML versiyonlarında bulunan ve iç mekâna ait nesnelere kapsayan LoD4 kavramından vazgeçilmiştir (Löwner vd., 2016). CityGML 3.0 veri formatına göre hacimsel gerçek dünya nesnelere, LoD0'da tek noktalar, LoD0/2/3'te çoklu yüzeyler, LoD1/2/3'te katılar, LoD2/3'te çoklu eğriler/çizgiler ile temsil edilebilir (OGC, 2021) (Şekil 6).



Şekil 5. CityGML 3.0 Bina Modülü (Kutzner, Chaturvedi, ve Kolbe, 2020)



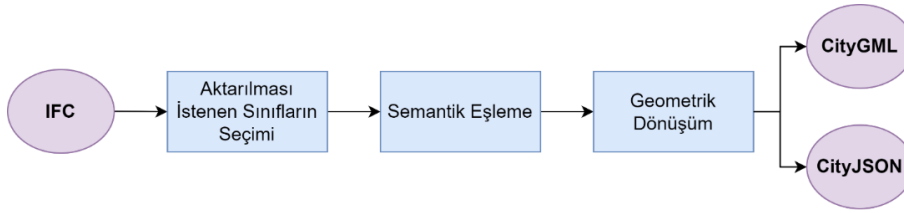
Şekil 6. Aynı binanın LoD0-3 arası ayrıntı düzeyi değişimi (OGC, 2021)

### 1.3.3. CityJSON

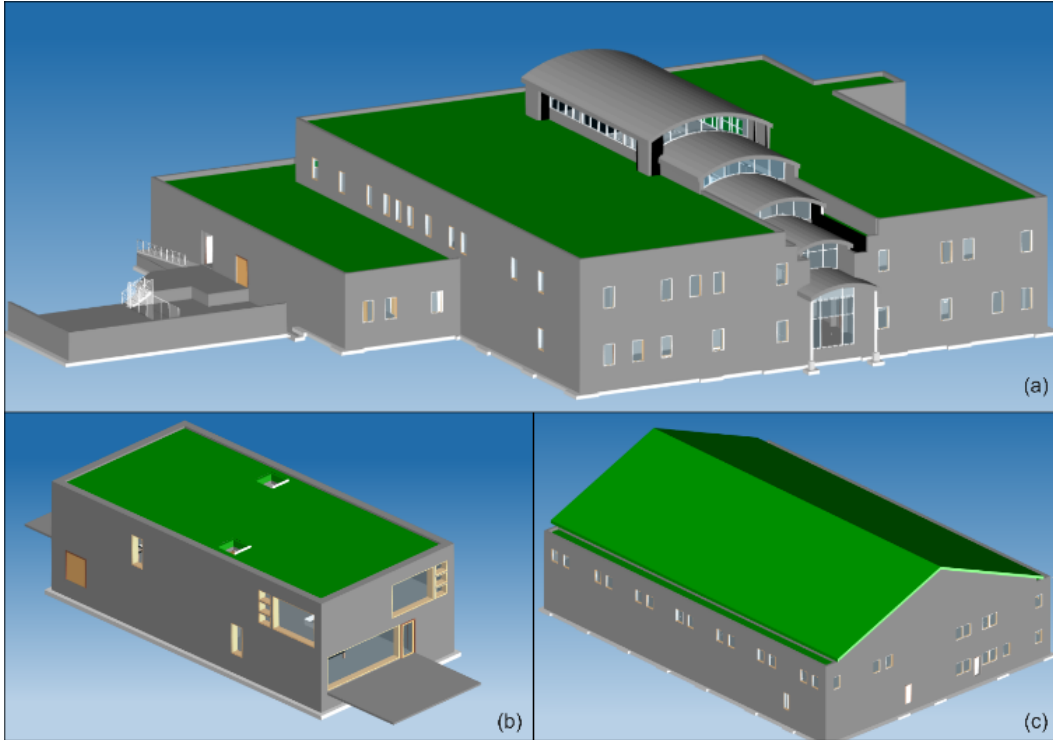
CityJSON, CityGML veri modelinin (sürüm 3.0) bir alt kümesi için insanlar tarafından okunabilen, bilgisayarların ayrıştırması ve kullanması kolay bir veri değişim formatı olarak tasarlanan JSON (JavaScript Object Notation) (Nurseitov, Paulson, Reynolds ve Izurieta, 2009) tabanlı bir kodlamadır. Kentlerin ve peyzajların/arazilerin sayısal 3B modellerinin nasıl saklanacağını tanımlar. CityJSON'un amacı, CityGML'in okunması ve işlenmesi için ayrıntılı ve karmaşık olabilen GML kodlamasına bir alternatif sunmaktır. CityJSON'un, hem veri setlerini okumak hem de bunları oluşturmak için kolay kullanıma sahip olması amaçlanmaktadır (Ohori vd., 2022a). CityJSON veri formatında bulunan "Building" sınıfında, çatı yüzeyi "RoofSurface", zemin ve döşemeler "GroundSurface", duvarlar "WallSurface", kapanış yüzeyleri "ClosureSurface", dış tavan yüzeyi "OuterCeilingSurface", dış zemin yüzeyi "OuterFloorSurface", pencere "Window" ve kapı "Door" sınıflarına öznitelik olarak sahip olabilmektedir (Ledoux ve Dukai, 2022).

## 2. Materyal ve Yöntem

YBM ve CBS veri entegrasyonu için IFC 2x3 formatında bulunan farklı geometrik ve semantik verilere sahip bir medikal klinik, bir ofis ve iki katlı bir apartmana ait statik, mimari ve tesisat projelerini içeren üç adet YBM (Şekil 8) (<https://www.wbdg.org/bim/cobie/common-bim-files>) geometrik dönüşüm ve semantik aktarım ile Safe FME Workbench yazılımı kullanılarak CityGML 2.0 ve CityJSON 1.0.1 veri formatlarına dönüştürülmüştür (Şekil 7).



Şekil 7. IFC'den CityGML ve CityJSON dönüşüm adımları

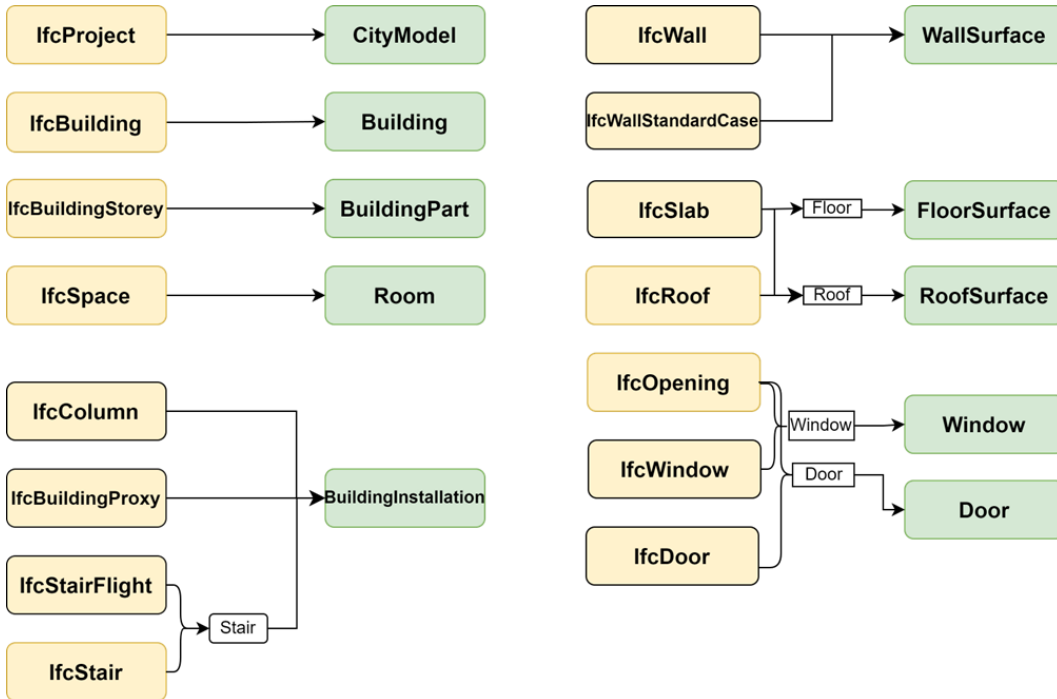


Şekil 8. (a) Medikal klinik, (b) iki katlı apartman ve (c) ofise ait statik ve mimari projelerin birleşimini içeren YBM'ler



## 2.1. Semantik Aktarım

YBM bütünlüğü için semantik ve geometrik bilgiler önemlidir. En yüksek verimlilikle birlikte çalışabilirlik, veri entegrasyonunun semantik yönüyle garanti edilir. Semantik birlikte çalışabilirliğin kilit noktası, veri dönüştürme sırasında bilgi yönetim sistemleri arasındaki özniteliklerin ve ilişkilerin korunmasını sağlamaktır (Malinverni vd., 2022). Geometri, semantik bilginin eklenebileceği çerçeveyi oluşturmaktadır ve yapı modellerini ek bilgilerle zenginleştiren semantiktir. Bu nedenle, geometrik verilerin yanında semantik veriler de doğru şekilde aktarılmalıdır. YBM'deki semantik veriler, bileşen türü ve kullanılan malzemeler gibi yapı bileşenlerinin öznitelikleri, özellikleri ve bu bileşenler arasındaki ilişkileri ifade eder (Zhu vd., 2022). Semantik aktarım, semantik eşleme yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir. Semantik eşleme, aktarılan semantiğin doğruluğunu sağlamak için IFC ve CityGML'deki sınıflar arasında bağlantıların kurulmasını ifade eder. Yapı elemanlarının eşlenmesi, özniteliklerin ve ilişkilerin eşlenmesini içerir (Zhu, Wright, Wang, ve Wang., 2018). Semantik eşleme, iki sınıf arasında bir bağlantı kurar, böylece kaynak sınıftan gelen bilgiler hedef sınıfa eşlenebilir (Zhu vd., 2022). Ancak, IFC'de sınıf sayısının fazla olması ve her verinin aktarılmasının gerekli olmaması nedeniyle çeşitli veri sınıfları seçilmiştir. CityGML'deki bir bina hem katı model hem de bu katı modelin yüzeyleri için semantik özelliklere sahip olabilir. IFC, semantiği depolamak için farklı bir yapıya sahiptir ve nesnelere ilişkiler ağı aracılığıyla birbirine bağlıdır. CityGML semantiğinin bir IFC nesnesinden çıkarılması için çoğu durumda IFC sınıfı ve nesnenin türü yeterlidir. Bununla birlikte, en uygun semantik eşleme için ilişkilerin anlaşılması da önemlidir (Donkers vd., 2016). IFC'nin hiyerarşik yapısının CityGML'den karmaşık olması (örneğin, IFC'de kapılar duvarlara ait açıklıklara, CityGML'de ise kapılar doğrudan duvarlara aittir.) ya da IFC'deki bazı yapı elemanı parçalarının farklı sınıflarda bulunması gibi (örneğin, pencerelerin ve merdivenlerin parçaları IfcMember sınıfında yer alır. Ancak, CityGML'e dönüştürülürken bu parçalar üst sınıfları olan pencere ya da merdivenlerde bulunmalıdır.) problemlerin çözülmesi için IFC'deki nesnelere alt soy ve üst soylarının bulunmasını gerektirir. IFC ve CityGML'in semantik eşlenmesinde Donkers vd. (2016) ve Cecchini (2019) (Şekil 9) esas alınarak ve eklemeler yapılarak eşleme yapılacak sınıflar belirlenmiştir. CityJSON'da ise "Building" sınıfı altında çeşitli semantik yüzeyler ile IFC varlıkları eşleştirilmiştir (Tablo 1).



Şekil 9. IFC ve CityGML sınıflarının semantik eşlenmesi (Sarı renk IFC sınıflarını ve yeşil renk CityGML sınıflarını göstermektedir. Siyah dış çizgisi olmayan kutucuklarda yer alan sınıflar geometrik bilgi taşımazlar) (Cecchini, 2019)

Tablo 1

## IFC sınıfları ve eşlendikleri CityGML ve CityJSON sınıfları

Sınıf	IFC Sınıfı	CityGML Sınıfı	CityJSON Sınıfı/ Semantik Yüzeyi
Proje	IfcProject	CityModel	Building
Bina	IfcBuilding	Building	Building
Oda	IfcSpace	Room	Building
Kolon	IfcColumn	BuildingInstallation	Building/ClosureSurface
Kiriş	IfcBeam	BuildingInstallation	Building/ClosureSurface
Döşeme	IfcSlab	FloorSurface	Building/GroundSurface
Temel	IfcFooting	BuildingPart	Building
Kapı	IfcDoor	Door	Building/Door
Pencere	IfcWindow	Window	Building/Window
Çatı	IfcRoof	RoofSurface	Building/RoofSurface
Duvar	IfcWall IfcWallStandardCase	WallSurface	Building/WallSurface
Cam Perde Duvar/ Giydirme Cephe Vitriini	IfcCurtainWall	Window	Building/Window
Cam	IfcPlate	Window	Building/Window
Dikme	IfcMember	Window	Building/Window
Merdiven	IfcStair	BuildingInstallation	Building
Merdiven Kolu	IfcStairFlight	BuildingInstallation	Building
Sahanlık	IfcSlab	BuildingInstallation	Building
Korkuluk ve Küpeşte	IfcRailing	BuildingInstallation	Building
Yanak (Kiriş profil)	IfcMember	BuildingInstallation	Building
Mobilya/ Eşya	IfcFurnishingElement	BuildingFurniture	Building
Tesisat	IfcFlowTerminal	IntBuildingInstallation	Building

## 2.2. Geometrik Dönüşüm

Geometrik dönüşüm, bina modellerinin geometrisinin CBS’de kullanılabilir biçimde dönüştürülmesidir. YBM ve CBS, farklı modelleme paradigmaları kullandığı için geometrik dönüşüm gereklidir. Bu durumda ele alınması gereken üç ana sorun; referans sistemi, 3B geometri ve ayrıntı düzeyi farklılıklarıdır (Zhu vd., 2018). Bu nedenle geometrik dönüşüm; koordinat sistemi dönüştürme, coğrafi referanslama ve temsil dönüştürme gibi bir dizi alt görevden oluşur (Zhu vd., 2022).

### 2.2.1 Temsil Dönüştürme

Modelleme paradigmasındaki farklılıklardan biri 3B modellerin açık veya örtük olabilmesinden kaynaklanmaktadır (Zhu vd., 2022). Temsil dönüştürme, örtük modellerin açık modellere dönüştürülmesini ifade eder. Örtük modeller, parametrik modelleme yöntemleriyle (CSG ve SS) oluşturulur ve bir dizi parametre ile temsil edilirken, açık modeller B-rep gibi açık noktalarla temsil edilirler. YBM, hem örtük modelleri hem de açık modelleri kullanabilir (Malinverni vd., 2020), yani IFC; CSG, B-rep ve SS’den birini veya bunların kombinasyonunu kullanabilmektedir (Ma vd., 2017). Parametrik modellerin şekil, boyut ve konumu kolayca ayarlanabildiği için, başka bir ifadeyle geometri düzenlemede daha esnek olmaları nedeniyle IFC, genellikle SS ve CSG’yi kullanır. IFC, parametrik olmayan B-Rep’i yalnızca gerektiğinde kullanır. CBS ise parametrik modellemede yetersiz olduğundan açık modelleri (katı modeller veya yüzey modelleri) kullanır. CSG ve SS’nin B-Rep’e dönüştürülmesi, bu modellerin CBS’de kullanılmasına olanak tanır (Zhu vd., 2022).

### 2.2.2. Coğrafi Referanslama

Coğrafi referanslama, orijinal olarak bir harita veya raster görüntüyü coğrafi mekânda karşılık geldiği konumla ilişkilendirme sürecini ifade eden bir terimdir. Bina modelleri, yol ağı gibi CBS ortamındaki diğer mekânsal veriler ile entegre edilecekse, coğrafi referanslama gereklidir (Zhu vd., 2021a). Bir nesneyi coğrafi referanslamak, nesnenin doğru coğrafi konuma yerleştirilmesi için koordinatlarının dönüştürülmesini kapsar

(Diakite ve Zlatanova, 2020). Coğrafi referanslama yöntemleri, CBS’de mevcuttur. Bu nedenle bu entegrasyondaki problemler, IFC standartlarından kaynaklanmaktadır (Zhu vd., 2022). Coğrafi referanslı YBM, CBS’deki diğer mekânsal veri setleriyle entegre edilebilir (Ingram, 2020). IFC4’ten önceki IFC sürümleri, mekânsal referans bilgilerinin tanımlanması için açıkça belirtilmiş bir varlığa sahip değildir ve coğrafi referanslama için yeterli olmadıkları düşünülmektedir. YBM ve CBS farklı koordinat sistemlerini farklı biçimlerde kullanır (Ma vd., 2017). YBM, nesnelerin lokal düzlemsel koordinat sisteminde (3B kartezyen koordinat sistemi) tanımlandığı lokal konumlandırma sistemini benimser. Bir nesnenin lokal konumlandırma sistemi, başka bir nesneyle ilişkilidir. Örneğin, bir pencerenin lokal konumlandırma sistemi, bir duvarın lokal konumlandırma sistemiyle ilişkili olabilir. Bu mekanizma, model değişikliğini kolaylaştırmaktadır (Zhu vd., 2018). CBS ise genellikle bölgeleri, ülkeleri ve hatta tüm dünyayı kapsayan uygulamalara odaklandığı için bir coğrafi koordinat sistemi kullanır; içindeki her nesne, enlem, boylam ve yükseklik şeklinde mutlak koordinatlara sahiptir (Deng, Cheng, ve Anumba, 2016; Zhu vd., 2022). CBS lokal düzlemsel koordinat sistemi de kullanılabilir, ancak çoğu durumda coğrafi koordinat sistemi kullanılmaktadır (Zhu vd., 2018). Bu nedenle, geometrik dönüşüm esnasında koordinat sistemi dönüşümü yapılmalıdır (Zhu vd., 2022). Referans sistemi dönüşümü için 2.1 ve 2.2 denklemlerinin kullanımı önerilmektedir. Lokal koordinat sistemindeki nesnelerin köşelerinin koordinatlarını hesaplamak için matris denklemi 2.1’de gösterildiği gibidir. Burada D, süpürme mesafesi ve  $(V_x, V_y, V_z)$ , süpürmenin yön vektörüdür (Wu ve Hsieh, 2007). Koordinatları lokal sistemden gerçek dünya sistemine dönüştürmek için matris denklemi 2.2’de bulunan  $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$  X, Y, Z koordinat sisteminin eksenlerini X', Y', Z' eksenlerine paralel yapmak için sırasıyla X' eksenini, Y' eksenini ve Z' eksenini etrafındaki dönüş açılarıdır.  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  ise yerel koordinat sisteminin orijininin gerçek dünya koordinat sistemine öteleme vektörüdür (Sani vd., 2018; Wu vd., 2007).

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = D \cdot \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

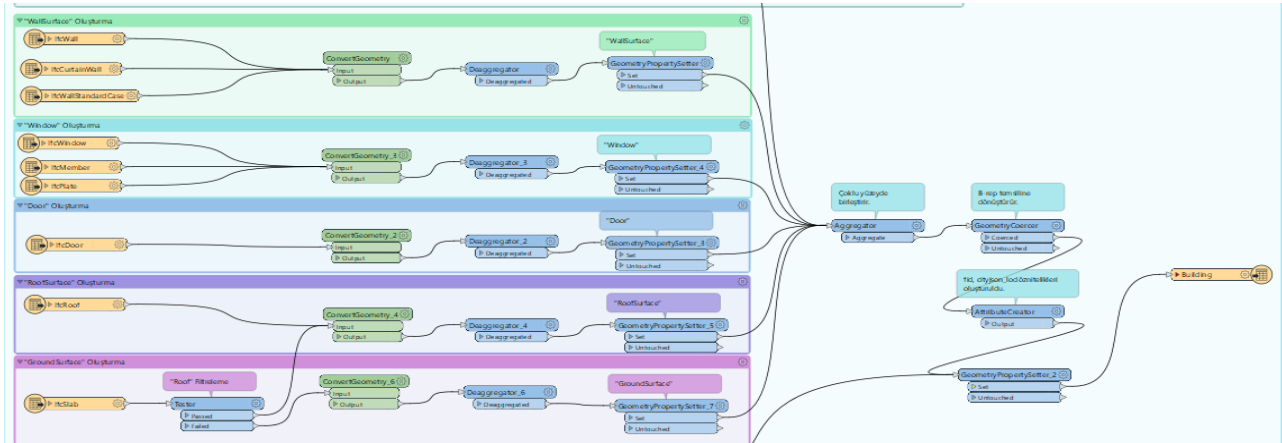
$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

### 2.2.3 Ayrıntı Düzeyi Dönüşümü

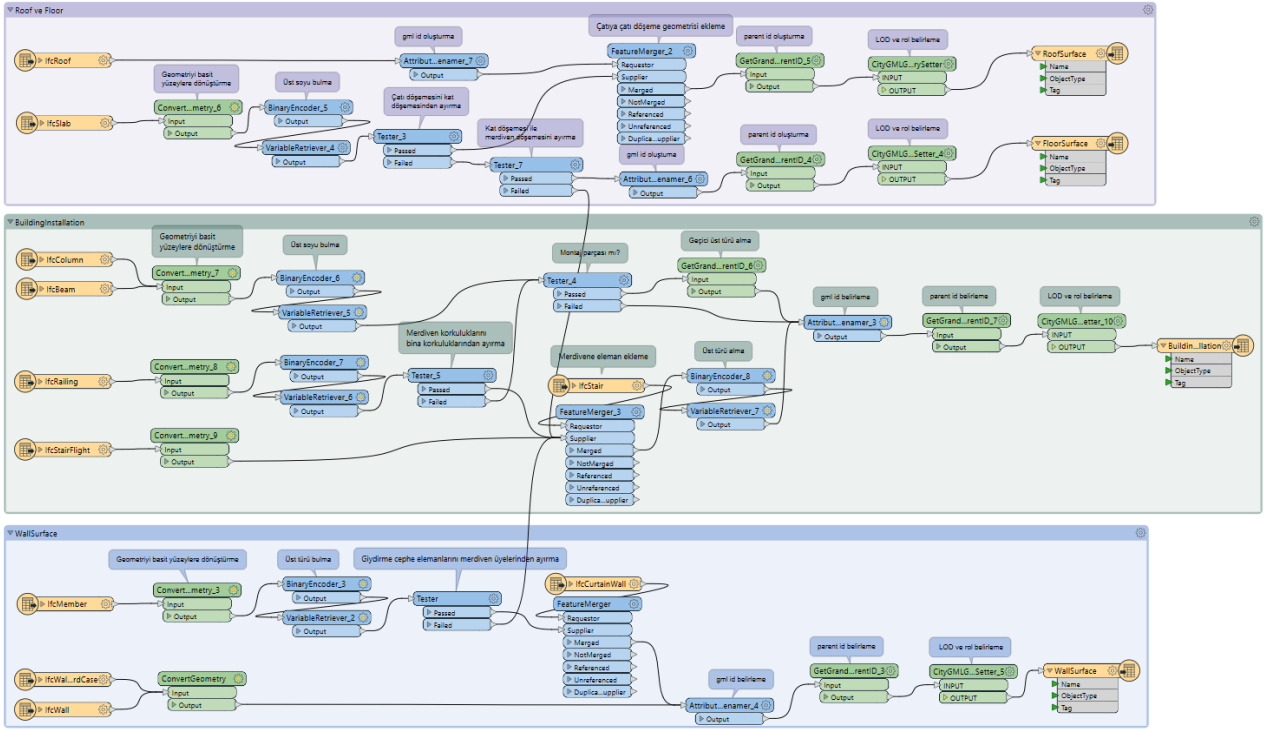
Hem YBM hem de CBS, bina modellerinde bulunan bilgi miktarını gösteren bir terime sahiptir (Zhu vd., 2022). Yapıların tasarımı ve planlaması, ön tasarım ve kavramsal planlama ile başlayıp uygulama planlaması ile bitecek biçimde adım adım gerçekleştirilir. Bu, inşaat mühendisliği ve bina inşaatında CBS ve YBM tabanlı planlama için eşit derecede geçerlidir. Bunun için sayısal modeller ve dolayısıyla bileşenler başlangıçta yalnızca kaba ayrıntılandırma gerektirir. Rafine planlama ile (planlama uygulaması veya planlama onayı için belgelerin sunulması, kütlelerin veya miktarların belirlenmesi, maliyet tahmini vb.), hem geometrik hem de semantik bilgi için ayrıntılandırma talepleri artar. Planlamada model nesnelerinin ayrıntılandırılmasıyla farklı gereksinimleri karşılamak için, LOD kavramı geliştirilmiştir. LOD kavramı, doğruluk düzeyiyle (level of accuracy - LOA) karıştırılmamalıdır. LOA, bir bileşenin mevcut durumunun ölçümündeki geometrik doğruluğu veya daha sonra ölçme verilerinden türetilen modelin geometrik doğruluğunu tanımlar (Blankenbach ve Becker, 2022). CityGML, modellerde yer alan bilgi miktarını belirtmek için LOD’dan kısmen farklı olarak LoD kavramını kullanmaktadır (Zhu ve Wu, 2022; Alhusban, 2021). LOD, YBM’deki çeşitli planlama aşamaları sırasında kademeli olarak daha ayrıntılı hale geldiğinden, çeşitli planlama aşamalarına uyacak biçimde oluşturulmuştur. Öte yandan CBS, zaten var olan gerçek dünyayı temsil ettiği için sisteme aktarılması gereken gerçek dünya nesnelerinin belirlenmesi gerekmektedir. LoD kavramı, genelleştirme ilkesini takip etmektedir. Düşük LoD’de, küçük veya daha az önemli yapı parçalarının veya elemanlarının modellenmediği veya basitleştirildiği anlamına gelir (Blankenbach vd., 2022). LoD, bütün bina modeline odaklanarak bina modelinin içermesi gerekenleri belirtmektedir. LOD ise binanın bileşenlerine ve bina bileşenlerinde nelerin olması gerektiğine odaklanmaktadır. Bu nedenle geometrik dönüşüm sırasında bulunması gereken yapı elemanlarını belirlemek önemlidir (Zhu ve Wu, 2021b).

### 3. Bulgular ve Tartışma

IFC'den CityGML'e ve CityJSON'a dönüşüm için medikal klinik, ofis binası ve iki katlı apartman olmak üzere üç farklı binada FME Workbench yazılımı ile geometrik dönüşüm ve semantik aktarım gerçekleştirilmiştir. YBM'deki binalara ait nesnelere LOD400 ayrıntı düzeyine sahiptirler. IFC 2x3'ten CityJSON 1.0.1'e dönüşüm için geometrik dönüşüm ve semantik aktarım gerçekleştirilmiştir. Geometrik dönüşüm için IFC'deki karmaşık katı model, FME Workbench'teki dönüştürücüler yardımıyla basit bileşik yüzeylere dönüştürülmüştür. Bu yüzeylerin CityJSON'daki semantik yüzeylerle eşleştirilebilmesi ve her bir yüzeyin ayrı olarak tanımlanabilmesi için yüzeyler ayrıştırılmıştır. Bu ayrıştırılan yüzeyler Tablo 1'de de belirtilen CityJSON'daki semantik yüzey isimlerine uygun olacak biçimde eşleştirilmiştir. Semantik olarak eşleştirilen bu yüzeyler B-rep geometrisi oluşturacak biçimde birleştirilmiştir. LoD ve kimlik verileri belirlenerek "Building" sınıfına aktarılmıştır (Şekil 10). IFC 2x3'ten CityGML 2.0'ye dönüşüm için geometrik dönüşüm ve semantik aktarım gerçekleştirilmiştir. Geometrik dönüşüm için IFC'deki karmaşık katı model FME Workbench'teki dönüştürücüler yardımıyla basit yüzeylere dönüştürülmüştür. Semantik aktarım için ise IFC sınıfları Tablo 1'de de belirtilen CityGML sınıflarıyla eşleştirilmiştir. Ancak, sınıfların eşleştirilmesinde çeşitli sorunlarla karşılaşmıştır. IFC'de nesneye ait parçaların farklı sınıflarda bulunması ya da farklı türdeki nesnelerin aynı sınıfta bulunması gibi karmaşıklıklar mevcuttur. Ayrıca, CityGML'de bina elemanlarının bulunduğu sınıfların az olması ve hiyerarşik yapısının farklı olması nedeniyle IFC'deki nesnelerin üst soylarına uygun olacak biçimde sınıflar oluşturulmuştur. Bu nedenle, öncelikle IFC sınıflarındaki varlıklara ait üst soy/alt soy bilgisi elde edilmiştir. Ardından, varlıklara ait soy bilgisi ve özellikler esas alınarak sorgulamalar yapılmıştır. CityGML'e aktarılabilecek varlıklara ait kimlik verileri, LoD'si ve yapıdaki rolleri belirlenerek CityGML'deki sınıflarla eşleştirilmiştir (Şekil 11). CityGML ve CityJSON'da LoD3 düzeyinde sonuçlar elde edilmiştir. Coğrafi referanslama ise IFC 2x3 versiyonunda binalara ait koordinat sistemleri, başlangıç koordinatları ve bunlar ile ilgili bilgi bulunmaması nedeniyle tam olarak gerçekleştirilememiş de FME Workbench ile ya da veri formatlarının dönüşümü sonucu CBS ortamına aktarılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak, CityJSON'ın CBS ortamında açılmasındaki problemlerden dolayı CityGML'in coğrafi referanslanması daha kolay gerçekleştirilmiştir. Bina bağlamındaki bulgular makalenin devamında incelenmiştir.

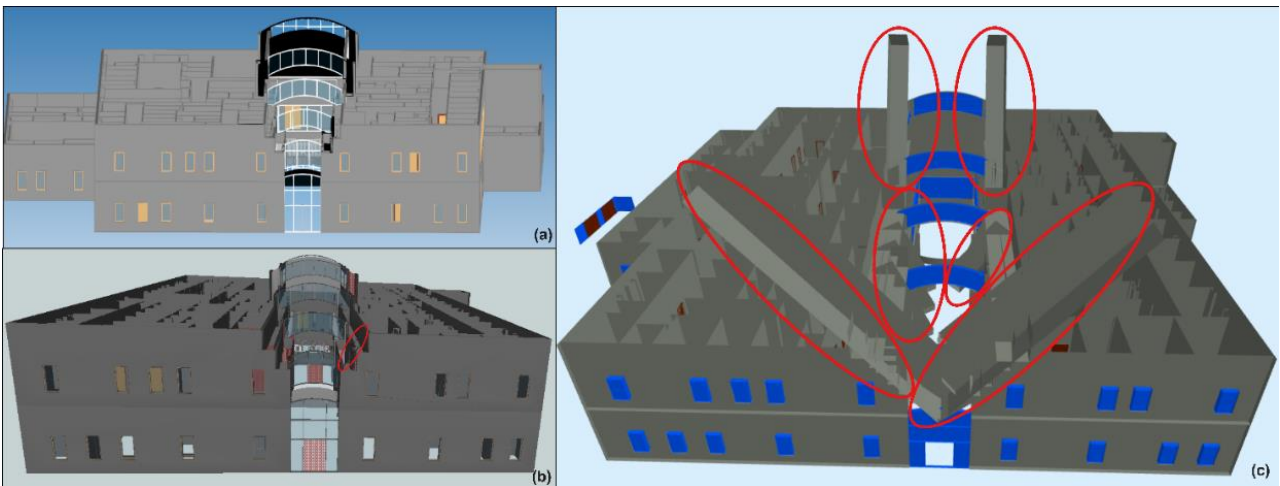


Şekil 10. FME Workbench ile IFC'den CityJSON'a dönüşüm örneği

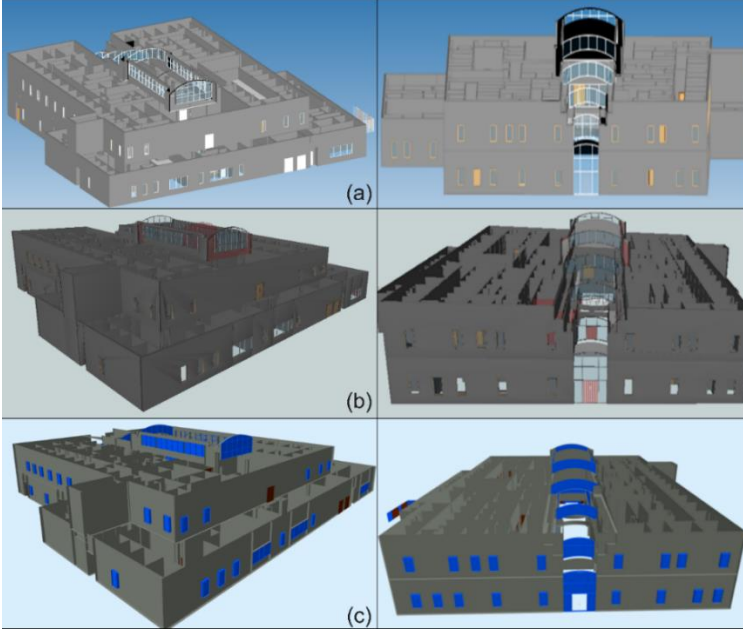


Şekil 11. FME Workbench ile IFC'den CityGML'e dönüşüm örneği

Medikal kliniğe ait mimari projenin IFC'den CityJSON'a dönüştürülmesinde semantik aktarımda problem yaşanmamıştır. Ancak, geometrik dönüşümde dış duvarların zikzaklı (girintili - çıkıntılı) olması nedeniyle binanın geometrik bütünlüğünü bozacak biçimde çıkıntılı dikdörtgen prizmalar oluşmuştur (Şekil 12). Binanın genel yapısının bozulmaması için sorgulamalar ile dikdörtgen prizmaların binadan çıkarılması sağlanmıştır. Ancak, yine de şekillerdeki bozukluklar tamamen giderilememiştir (Şekil 13). Aynı zamanda, bina dokusunun korunması için "IfcCurtainWall" olarak bulunan cam içeren giydirme cephe vitrinlerinin "wall" yerine "window" olarak aktarılması tercih edilmiştir. IFC'den CityGML'e dönüşümde ise semantik aktarımda problem yaşanmamıştır. Geometrik dönüşümde ise zikzaklı yapıda ince bir dikdörtgen prizma meydana gelse de (Şekil 12) bina bütünlüğü bozulmamaktadır (Şekil 13).

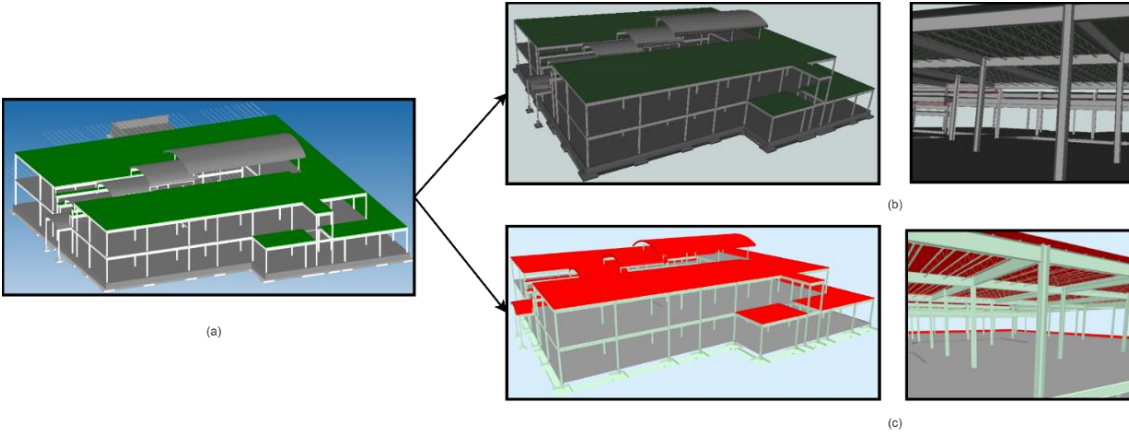


Şekil 12. Medikal klinik mimarisi: (a) IFC, (b) CityGML ve (c) CityJSON formatı



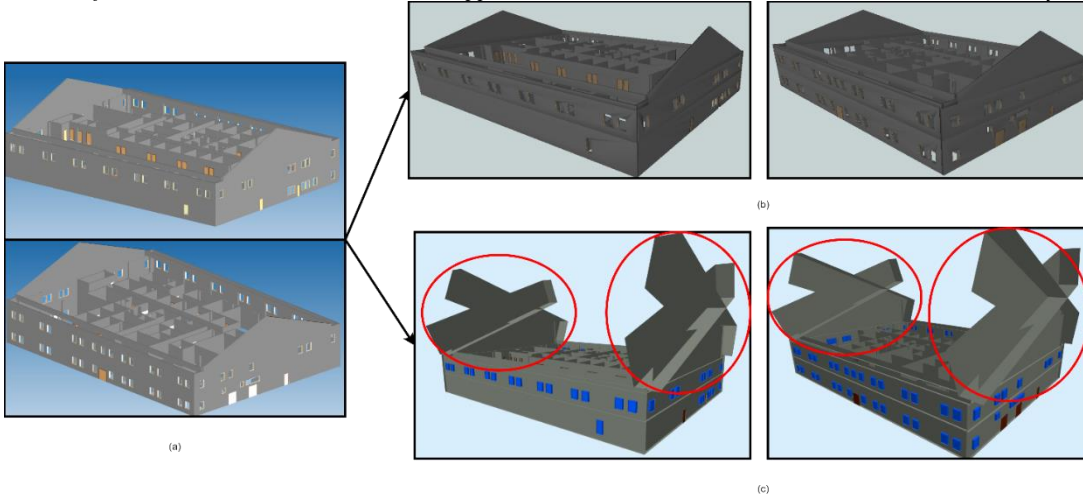
Şekil 13. Medikal kliniğine ait mimari projenin (a) IFC'den (b) CityGML ve (c) CityJSON formatına dönüşümü

Medikal kliniğe ait statik projenin IFC'den CityJSON'a dönüştürülmesinde geometrik dönüşüm ve semantik aktarımda problem yaşanmamıştır. IFC'den CityGML'e dönüşümde ise semantik aktarımda IfcRoof ve IfcSlab'ın üst soy/alt soy karmaşası nedeniyle metal çatı nesnelere geometrik olarak aktarılamamıştır. Bu problem çatı olarak aktarılan semantik nesne sınıfının "roofsurface" yerine "floorsurface" olarak aktarılması ile çözülmüştür. Bu sayede geometrik dönüşümde de sorun kalmamıştır (Şekil 14).

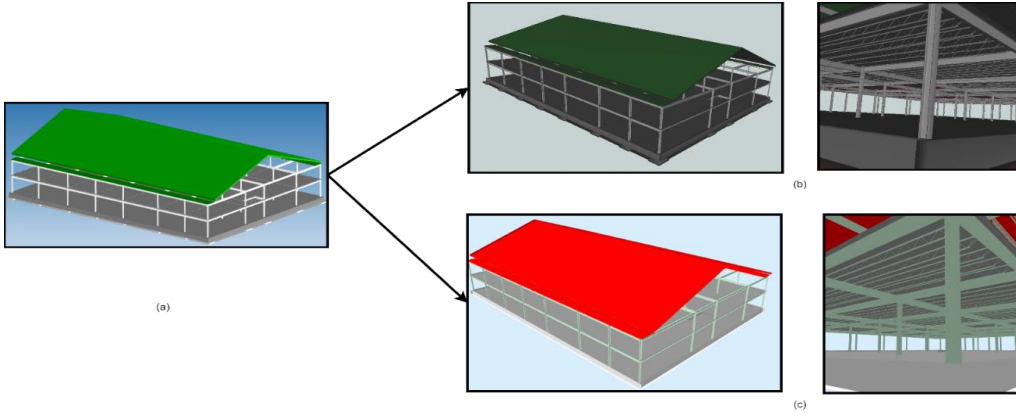


Şekil 14. Medikal kliniğine ait statik projenin (a) IFC'den (b) CityGML ve (c) CityJSON formatına dönüşümü

İnceleme yapılan diğer bir bina ise ofis binasıdır. Ofis binasına ait mimari projenin IFC'den CityJSON'a dönüştürülmesinde semantik aktarımda problem yaşanmamıştır. Ancak, geometrik dönüşümde dış duvarların üçgen biçiminde olması nedeniyle binanın geometrik bütünlüğünü bozacak biçimde çıkıntılı dikdörtgen prizmalar oluşmuştur. IFC'den CityGML'e dönüşümde ise geometrik dönüşüm ve semantik aktarımda problem yaşanmamıştır (Şekil 15). Ofis binasına ait statik projenin IFC'den CityJSON'a dönüştürülmesinde geometrik ve semantik olarak problem yaşanmamıştır. IFC'den CityGML'e dönüşümde ise semantik aktarımda IfcRoof ve IfcSlab'ın üst soy/alt soy karmaşası nedeniyle metal çatı nesnelere geometrik olarak aktarılamamıştır. Bu problem, çatı olarak aktarılan semantik nesne sınıfının "roofsurface" yerine "floorsurface" olarak aktarılması ile çözülmüştür. Bu sayede, geometrik dönüşümde de sorun kalmamıştır (Şekil 16).

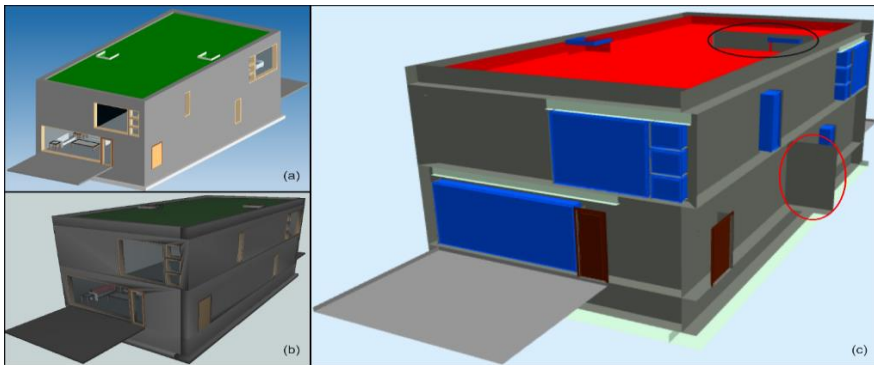


Şekil 15. Ofis binasına ait mimari projenin (a) IFC'den (b) CityGML ve (c) CityJSON formatına dönüşümü



Şekil 16. Ofis binasına ait statik projenin (a) IFC'den (b) CityGML ve (c) CityJSON formatına dönüşümü

İnceleme yapılan son bina ise iki katlı apartmandır. İki katlı apartmana ait projenin IFC'den CityJSON'a dönüştürülmesinde semantik aktarımda problem yaşanmamıştır. Ancak, geometrik dönüşümde bitişik duvarlarda ve çatıya ait bir duvarda bina dışına uzanan duvarlar oluşmuştur. IFC'den CityGML'e dönüşümlerde geometrik ve semantik aktarımda problem yaşanmamıştır (Şekil 17).



Şekil 17. İki katlı apartmana ait projenin (a) IFC'den (b) CityGML ve (c) CityJSON formatına dönüşümü

Farklı binaların IFC'den CityGML'e dönüşümler incelendiğinde geometrik dönüşümlerde zikzak biçiminde olan geometriler hariç sorun yaşanmamıştır. Semantik aktarımda ise karmaşık hiyerarşik yapılar nedeniyle genellikle çatı aktarımında problemler meydana gelmiştir. IFC'den CityJSON'a dönüşümler incelendiğinde ise zikzaklı, üçgen ya da birbirine bitişik geometrilerin çeşitli sorunlara neden olduğu gözlemlenmiştir. Semantik aktarımda ise tüm nesnelere "Building" sınıfında yer alırken, semantik yüzeylerin öznitelik olarak bulunması semantik aktarımı kolaylaştırmıştır. Ancak, semantik yüzey sayısının az olması nesnelere buldukları sınıfların anlaşılabilirliğini azaltmıştır. Ayrıca, CityGML'e göre yeni bir format olan CityJSON'ın okunabildiği programlarda bile hata vermesi gibi bazı zorluklarla karşılaşmıştır. CityJSON formatı, henüz geniş kullanıcı kitlesine sahip olmadığından, mevcut coğrafi veri işleme araçlarıyla tam uyumluluk sağlayamayabilir, doğrudan desteklenmeyebilir veya sınırlı destek sunabilir. Bu nedenle, gelecekte CityJSON'ın geniş kitlelere ulaşmasıyla birlikte uyumluluk sorunlarının azalacağı düşünülmektedir.

#### 4. Sonuçlar

Bu makalede, YBM ve CBS entegrasyonu, başlıca açık formatlar kullanılarak geometrik dönüşüm ve semantik aktarım adımlarıyla uygulamalı olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda, bir medikal klinik, bir ofis binası ve iki katlı bir apartmanın statik ve mimari projelerine ilişkin YBM'ler, FME Workbench yazılımı ile IFC formatından, semantik 3B kent modeli veri değişim formatları olan CityGML ve CityJSON'a LoD3 ayrıntı düzeyinde dönüştürülmüştür. Bu dönüşümler incelendiğinde, CityGML ve CityJSON veri formatlarıyla basit ve ayrık geometrilerin dönüşümünde oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, CityGML veri formatı karmaşık ve bitişik geometrilere sahip binalarda CityJSON'a göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Semantik aktarımda ise, IFC'den CityGML'e farklı sınıfların oluşturulması, CityJSON'daki semantik yüzeylerin öznitelik olarak aktarılmasından daha karmaşıktır ve uygulanmasını zorlaştırmaktadır. CityJSON, şu aşamada geometrik ve semantik açıdan karmaşıklığı az olan uygulamalar için uygun bir çözüm yolu sunmaktadır. CityJSON'ın okunabildiği programların artması ile coğrafi referanslama ve analizlerin kolaylaşması beklenmektedir. Ayrıca, CityGML'e kıyasla türetildiği veri formatı (XML'e karşın JSON) dikkate alındığında web ortamında daha avantajlı olması da gelecekteki çalışmalar için tercih edilirliliğini arttırabilir. Ek olarak, CitySON'da semantik aktarım için yeni semantik yüzeyler tanımlanarak eşleme işleminin kolaylaştırılabileceği düşünülmektedir.

#### Yazar Katkıları

Özlem Korkmaz: Literatür araştırması, yöntem geliştirme, veri edinimi, uygulama ve makale yazımı

Melih Başaraner: Çalışmanın kurgulanması, literatür araştırması, yöntem geliştirme ve makalenin gözden geçirilerek iyileştirilmesi

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

#### Kaynakça

- Adouane, K., Stouffs, R., Janssen, P., ve Domer, B. (2020). A model-based approach to convert a building BIM-IFC data set model into CityGML. *Journal of Spatial Science*, 65(2), 257-280. <https://doi.org/10.1080/14498596.2019.1658650>
- Al Kalbani, K., ve Rahman, A. A. (2022). 3D city model for monitoring flash flood risks in Salalah, Oman. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(1), 17-23. <https://doi.org/10.26833/ijeg.857971>
- Alhusban, M. (2021). Understanding BIM information management processes through international BIM standards. Hosseini, R. M., Khosrowshahi, F., Aibinu, A. A., ve Abrishami, S. (ed.). *BIM teaching and learning handbook - implementation for students and educators*. Oxon, Routledge, 169-183.
- Demir Altıntaş, Y., ve İlal, M. E. (2022). Integrating building and context information for automated zoning code checking: A review. *ITcon*, 27, 548-570. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.027>
- Bansal, V. K. (2021). Integrated framework of BIM and GIS applications to support building lifecycle: a move toward nD modeling. *Journal of Architectural Engineering*, 27(4), 05021009.



- Biljecki, F., Kumar, K., ve Nagel, C. (2018). CityGML Application Domain Extension (ADE): overview of developments. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1), 1-17. <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0055-6>
- Blankenbach, J., ve Becker, R. (2022). Building information modeling. Kresse, W., & Danko, D. (ed.) *Springer handbook of geographic information*, 2. baskı. Springer, Berlin, 613-628. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-53125-6>
- Bolpagni, M., (2022). Building information modelling and information management. Bolpagni, M., Gavina, R., ve Ribeiro, D. (ed.). *Industry 4.0 for the built environment: Methodologies, technologies and skills*. Structural Integrity 20. cilt, Springer, Cham, 29-39. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82430-3>.
- Borrmann, A., Beetz, J., Koch, C., Liebich, T., ve Munic, S. (2018). Industry foundation classes: A standardized data model for the vendor-neutral exchange of digital building models. Borrmann, A., König, M., Koch, C., ve Beetz, J. (ed). *Building information modeling: Technology foundations and industry practice*. Springer Nature, 81-126. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3>
- Casini, M. (2022). Building information modeling. Casini, M. (ed.) *Construction 4.0: Advanced technology, tools and materials for the digital transformation of the construction industry*. Woodhead Publishing, Kidlington, 189-219.
- Cecchini, C. (2019). From data to 3D digital archive: A GIS-BIM spatial database for the historical centre of Pavia (Italy). *Journal of Information Technology in Construction*, 24(Nov), 459-471. Erişim adresi: <https://www.itcon.org/2019/24>
- Chen, L. C., Wu, C. H., Shen, T. S., ve 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, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.01.003>
- Costin, A., Ouellette, J. W., ve Beetz, J. (2023). Building product models, terminologies and object type libraries. Pauwels, P., ve McGlenn, K. (ed.) *Buildings and semantics*. CRC Press/Balkema, Leiden, 4-24.
- Deng, Y., Cheng, J. C. P., ve Anumba, C. (2016). Mapping between BIM and 3D GIS in different levels of detail using schema mediation and instance comparison. *Automation in Construction*, 67, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.006>
- Donkers, S., Ledoux, H., Zhao, J., ve Stoter, J. (2016). Automatic conversion of IFC datasets to geometrically and semantically correct CityGML LOD3 buildings. *Transactions in GIS*, 20(4), 547-569. <https://doi.org/10.1111/tgis.12162>
- Kang, T. (2018). Development of a conceptual mapping standard to link building and geospatial information. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(5), 162. <https://doi.org/10.3390/ijgi7050162>
- Herle, S., Becker, R., Wollenberg, R., ve Blankenbach, J. (2020). GIM and BIM: How to obtain interoperability between geospatial and building information modelling? *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(1), 33-42. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00090-4>
- Hor, A. H., Jadidi, A., ve Sohn, G. (2016). BIM-GIS integrated geospatial information model using semantic web and RDF graphs. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences III-4*, 73-79. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-4-73-2016>
- Niu, S., Pan, W., ve Zhao, Y. (2015). A BIM-GIS integrated web-based visualization system for low energy building design. *Procedia Engineering*, 121, 2184-2192. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.091>
- Isikdag, U., Underwood, J., Aouad, G., ve Trodd, N. (2007). Investigating the role of building information models as a part of an integrated data layer: a fire response management case. *Architectural Engineering and Design Management*, 3(2), 124-142. <https://doi.org/10.1080/17452007.2007.9684636>
- Ingram, J. (2020). *Understanding BIM: The past, present and future*. Routledge, Abingdon, Oxon.
- Karan, E. P., Irizarry, J., ve Haymaker, J. (2015). BIM and GIS integration and interoperability based on semantic web technology. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(3), 04015043. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000519](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000519)
- Kolbe, T. H., ve Donaubaue, A. (2021). Semantic 3D city modeling and BIM. Shi, W., Goodchild, M. F., Batty, M., Kwan, M., ve Zhang, A. (ed.). *Urban informatics*. Springer, Singapore, 609-636. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6\\_34](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6_34)
- Kutzner, T., Chaturvedi, K., ve Kolbe, T. H. (2020). CityGML 3.0: New functions open up new applications. *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(1), 43-61.

- <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00095-z>
- Lawrence, T., Darwich, A. K., ve Means, J. K. (2018). Project strategies and early design. Lawrence, T., Darwich, A. K., ve Means, J. K. (ed.). *ASHRAE green guide design, construction, and operation of sustainable buildings*, 5. baskı, ASHRAE, Atlanta, 41-71.
- Ledoux, H. ve Dukai, B. (2022). *CityJSON Specifications 1.1.3*. Erişim adresi: <https://www.cityjson.org/specs/1.1.3/>
- Ledoux, H., Ohori, K. A., Kumar, K., Dukai, B., Labetski, A., ve Vitalis, S. (2019). CityJSON: A compact and easy-to-use encoding of the CityGML data model. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0064-0>
- Liu, X., Wang, X., Wright, G., Cheng, J. C. P., Li, X., ve 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>
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., ve Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems*, 4. baskı. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 1-32.
- Longley, P. A. (2008). Geographic information systems (GIS). Kemp K (ed.). *Encyclopedia of geographic information science*. SAGE Publications, Thousand Oaks, California, 190-194.
- Ma, Z., ve Ren, Y. (2017). Integrated application of BIM and GIS: An overview. *Procedia Engineering*, 196, 1072-1079. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.064>
- Malinverni, E. S., Naticchia, B., Lerma Garcia, J. L., Gorreja, A., Lopez Uriarte, J., ve di Stefano, F. (2022). A semantic graph database for the interoperability of 3D GIS data. *Applied Geomatics*, 14, 53-66. <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00334-3>
- Nurseitov, N., Paulson, M., Reynolds, R., ve Izurieta, C. (2009). Comparison of JSON and XML data interchange formats: A case study. *Caine*, 9, 157-162. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=84321e662b24363e032d680901627aa1bfd6088f>
- OGC (2021). *OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard*, Erişim adresi: <https://docs.ogc.org/is/20-010/20-010.html>
- Ohori, K. A., Ledoux, H., ve Peters, R. (2022a). Chapter 10: Semantic 3D city models. *3D modeling of the built environment v.08* (Yayımlanmamış kitap), 91-105. Erişim adresi: <https://github.com/tudelft3d/3dbook/releases>
- Ohori, K. A., Ledoux, H. ve Peters, R. (2022b). Chapter 11: Building information models. *3D modeling of the built environment v.08* (Yayımlanmamış kitap). 107-116. Erişim adresi: <https://github.com/tudelft3d/3dbook/releases>
- Rajabifard, A., Atazadeh, B., ve Kalantari, M. (2019). Chapter 3: Fundamentals of the BIM environment - opportunities for land administration. *BIM and urban land administration*. CRC Press, Boca Raton, 81-120.
- Sani, M. J., ve Rahman, A. A. (2018). GIS and BIM integration at data level: A review. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-4/W9*, 299-306. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-299-2018>
- Sulaiman, M., Liu, H., Binalhaj, M., Al-Kasasbeh, M., ve Abudayyeh, O. (2021). ICT-based integrated framework for smart facility management: An industry perspective. *Journal of Facilities Management*, 19(5), 652-680. <https://doi.org/10.1108/JFM-11-2020-0084>
- Teo, T. A., ve Cho, K. H. (2016). BIM-oriented indoor network model for indoor and outdoor combined route planning. *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), 268-282. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.04.007>
- Vacca, G., ve Quaquero, E. (2020). BIM-3D GIS: an integrated system for the knowledge process of the buildings. *Journal of Spatial Science*, 65(2), 193-208. <https://doi.org/10.1080/14498596.2019.1601600>
- Wang, H., Pan, Y., ve Luo, X. (2019). Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: a review and bibliometric analysis. *Automation in Construction*, 103, 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.005>
- Wang, M., Deng, Y., Won, J., ve Cheng, J. C. (2019). An integrated underground utility management and decision support based on BIM and GIS. *Automation in Construction*, 107, 102931. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102931>
- Wong, J. K. W., Ge, J., ve He, S. X. (2018). Digitisation in facilities management: A literature review and

- future research directions. *Automation in Construction*, 92, 312-326. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.006>
- Wu, I. C., Hsieh, S. H. (2007). Transformation from IFC data model to GML data model: methodology and tool development. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 30(6), 1085–1090. <https://doi.org/10.1080/02533839.2007.9671335>
- Xia, H., Liu, Z., Efremochkina, M., Liu, X., ve Lin, C. (2022). Study on city digital twin technologies for sustainable smart city design: A review and bibliometric analysis of geographic information system and building information modeling integration. *Sustainable Cities and Society*, 84, 104009. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104009>
- Zhao, L., Liu, Z., ve Mbachu, J. (2019). An integrated BIM–GIS method for planning of water distribution system. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(8), 331. <https://doi.org/10.3390/ijgi8080331>
- Zhu, J., Wang, X., Wang, P., Wu, Z., ve Kim, M. J. (2019). Integration of BIM and GIS: geometry from IFC to shapefile using open-source technology. *Automation in Construction*, 102, 105-119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.014>
- Zhu, J., Wright, G., Wang, J., ve 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>
- Zhu, J., ve Wu, P. (2021a). Towards effective BIM/GIS data integration for smart city by integrating computer graphics technique. *Remote Sensing*, 13(10), 1889. <https://doi.org/10.3390/rs13101889>
- Zhu, J., ve Wu, P. (2021b). 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>
- Zhu, J., ve 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>