



Geoteknik Uygulamaların Yapı Bilgi Modellemesi ile IFC Tabanlı Modellenmesi

Araştırma Makalesi
Research Article

Muhammet Çınar¹, Halit Aslan²

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kahramanmaraş, Türkiye. ORCID: 0000-0001-5475-7787, e-posta: muhammetcinar@ksu.edu.tr

² Yüksek Lisans Öğrencisi Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kahramanmaraş, Türkiye. ORCID: 0000-0003-1777-2456, e-posta: hltaslan1283@gmail.com

ÖZ

Kentsel alanlarda artan barınma, ulaşım ve altyapı ihtiyaçlarına yönelik çözüm modelleri geliştirilmektedir. Bu sorunları ele almanın önemli bir yolu, farklı mekânsal bilgilerin entegre bir şekilde işlenmesi ve çok yönlü bir yaklaşımla ele alınmasıdır. Gelişen teknoloji, bu tür zorlukların üstesinden gelmek için yazılım programları sunmuştur. Yapı Bilgi Modelleme (YBM) teknolojisi, bu programları bir araya getirerek sayısal hesaplama ve geometrik gösterimleri tek bir platformda birleştirir. YBM genellikle bina ve kent modellerini içerir, ancak bu çalışma, kentsel yapılarla sınırlı bir alanda geoteknik yapıları ve zemin özelliklerini YBM ile modellenebileceğini göstermektedir. YBM'de modeller ayrıntı düzeyleri ile ifade edilir ve Endüstri Temel Sınıfları (ETS, IFC) tabanlı formatlar kullanılarak oluşturulur, sonra YBM yazılımları arasında veri akışını sağlar. Bu çalışmada geoteknik yapılar IFC tabanlı ayrıntı düzeyiyle üç boyutlu olarak modellenmiştir. Bina modellerinde olmayan geoteknik yapı elemanları da YBM'ye dâhil edilmiştir. Bu çalışma, yapı elemanlarını tek bir modelde bir araya getirerek yapıların kullanım ömrü boyunca erişimini kolaylaştırmayı amaçlamaktadır.

MAKALE BİLGİSİ

Geliş 14 / 12 / 2023
Kabul 16 / 02 / 2024

ANAHTAR KELİMELER

Yapı bilgi modelleme (YBM)
Geoteknik yapılar
Endüstri temel sınıfları (ETS)
3B model

IFC Based Modeling of Geotechnical Applications with Building Information Modeling

ABSTRACT

Solution models are being developed to address the increasing housing, transportation, and infrastructure needs in urban areas. An important way to address these issues is through the integrated processing of different spatial information and a multifaceted approach. Advancing technology has introduced software programs to overcome such challenges. Building Information Modeling (BIM) technology brings these programs together, combining numerical calculations and geometric representations on a single platform. BIM usually includes building and city models, but this study shows that geotechnical structures and soil properties in an area limited to urban structures can be modeled with BIM. In BIM, models are expressed in levels of detail and created using Industry Foundation Classes (IFC) based formats, then enable data flow between BIM software. In this study, geotechnical structures were modeled in 3D with IFC-based detail level. Geotechnical structure elements that are not in the building models are also included in BIM. This study aims to facilitate access to buildings throughout their lifetime by bringing together building elements in a single model.

ARTICLE HISTORY

Received 14 / 12 / 2023
Accepted 16 / 02 / 2024

KEYWORDS

Building information modeling (BIM)
Geotechnical structures
Industry foundation classes (IFC)
3D model

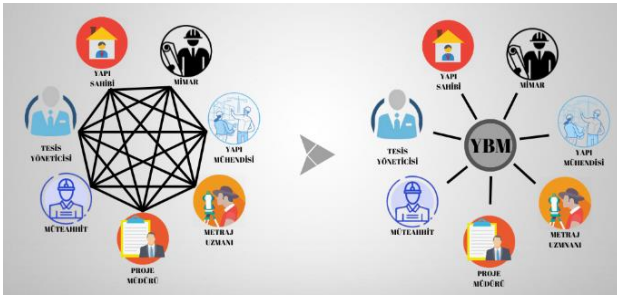
GİRİŞ

Artan şehirleşme ile özellikle büyük şehirlerde daha yüksek yapılara ve daha çok barınma alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple, artan nüfus ile birlikte altyapı sistemlerinin ihtiyaçları karşılamaları için yeniden tasarlanarak yeni altyapı sistemleri eklenmekte ya da var olan değiştirilmektedir. Bu ihtiyacın artmasından dolayı

özellikle şehir merkezlerinde taşıma gücü yönünden zayıf, sivilaşma riski yüksek ve riskli bölgelerin kullanımı artmaya başlamıştır. Bundan dolayı zemin özelliklerini geliştirmek amacı ile zemin iyileştirme yöntemlerine daha çok ihtiyaç duyulmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ve kentleşmenin artması, daha karmaşık sistemlerle karşı karşıya kalınmasını sağlamaktadır. Bu durum altyapı,

üstyapı ve iksa yapılarına olan ihtiyacı arttırmıştır ve hepsinin aynı anda 3 boyutlu (3B) bir şekilde görülmesini mümkün kılan Yapı Bilgi Modelleme (YBM) gibi teknolojik gelişmeleri ortaya çıkarmıştır.

Kentsel alanlarda altyapı sistemleri önemli bir unsurdur. Bununla birlikte altyapılar hakkında birçok belirsizlik bulunmaktadır (Christian, 2004; Phoon ve diğ., 2022; Phoon ve Tang, 2019). Bu belirsizliklere zemin etüdü kayıtlarında yer almayan tarihi ve güncel gömülü yapılar (içme su şebekeleri, doğal gaz boruları, elektrik ve internet kabloları vb.) örnek verilebilir (Tawelian ve Mickovski, 2016). Bu nedenle altyapıların projelendirilmesinden önce saha araştırması yapılması gerekmektedir. Ancak her ne kadar saha araştırması yapılsa bile diğer alt yapı sistemlerinin 3B modelleri olmadığı için her zaman kentsel alanlarda zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu bakımdan YBM ile beraber saha araştırması ile belirsizlikleri, risk ve maliyetleri tamamen olmasa bile azaltmak için geoteknik yapı alanında uygulanabilir (Berdiglyjov ve Popa, 2019). Buna karşın, geoteknik uygulamalarda zemin, yapılar arasında bir yük aktarma mekanizması olarak düşünüldüğünde, zemin ile etkileşim içinde olan yapıların bir bütün olarak ele alınması gerekmektedir (Huo ve diğ., 2005; Vanıcek ve diğ., 2021; Wang ve diğ., 2013). YBM teknolojisi ile oluşturulan 3B dijital modeller ile yapılar bir bütün olarak oluşturulabilmektedir. Böylece herhangi bir proje için mühendislerin yapımını üstlendiği yapı ile ilgili çeşitli bilgileri yansıtan dijital modeller sayesinde daha doğru kararların verilebilmesi sağlanabilmektedir. (Şekil 1)



Şekil 1. YBM ile tek bir proje üzerinden veri akışı

Günümüzde geoteknik yapılara olan ihtiyaç arazi yetersizliğinden ve taşıma gücü zayıf bölgelerin imara açılmasından dolayı artmaktadır. Arazi yetersizliğinden dolayı ve imar durumlarından binalar çok katlı ya da çok katlı olamıyor ise derin kazılar yapılarak bodrum kat âdeti artmaktadır. Derin kazılarda genellikle iksa yapıları kullanılır. Bunlar istinat duvarı, fore kazık, ankrajlı diyafram duvar vb. gibi sıralanabilir. Buna karşılık zemin koşulları ve mevcut gömülü altyapının konumu hakkındaki bilgi eksikliği nedeniyle geoteknik yapıların imalat aşamasında ve sonrasında riskler artabilir (Marache ve diğ., 2009; Morin, 2017; Zhu ve diğ., 2003). YBM teknolojisi sayesinde zeminin ve çevre yapıların görselleştirilmesini ve bilgilerini sunan 3B modeller ile bu risklerin azaltılmasına yardımcı olmaktadır (Wu ve diğ., 2015). Bununla birlikte, verilerin doğru şekilde elde edilmesi ve kullanılması bu tür modellerin önemli yönleridir.

Uray ve diğ., 2018 çalışmasında Konya'nın simgesi olma özelliğini taşıyan İnce Minareli Medrese seçmiştir. Çalışma sonunda bu yapının 3B modelini üretip elde edilen model gerçek ölçeğinde fotogrametrik verilerin kullanıldığı üç boyutlu YBM oluşturmuştur. Yaylalı ve Aydar, 2022 çalışmasında bir fabrikaya ait yağmur su ana hattı, atık su ana hattı, alçak gerilim hattı, orta gerilim hattı, tekil ve lineer yağmur su toplama hatları YBM yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Yeni hatların yapılması veya mevcut hatlarda karşılaşılabilecek sorunlara müdahale etmek için kazı çalışmalarına gereksinim duyulmaktadır. Yapılan kazı çalışmalarında mevcutta bulunan altyapının konum ve kot bilgisi net olarak bilinemediğinde mevcut altyapıya zararlar verme durumu sürekli karşılaşılan bir durumdur. Bu da işleri aksatmakta, maliyeti arttırmakta ve bu altyapıyı kullanan insanların mağduriyetine sebep olmaktadır. Bundan dolayı tek bir fabrikada bulunan altyapı elemanları modellenmiştir.

Bayer ve diğ., 2023 çalışmasında Van YYÜ merkez Kampüsü yerleşkesi içerisinde yer alan Mühendislik Fakültesi binası yakın çevresini kapsayan yaklaşık 32.000 m² alanda, YBM araçları desteği ile peyzaj proje çalışmalarına altlık olabilmesi amacı ile bir model geliştirmiştir. Bu modelin geliştirilmesinde yöntem içeriğinde YBM yazılım programı kullanılmış ve dört aşamadan oluşan yöntem basamaklarında; bitkisel özellikler ve bitki türleri, yeşil alan bilgileri, kullanılan kent mobilyaları, bina bilgisi, sert zemin ve otopark alanı bilgileri ve özellikleri detaylı olarak ortaya koyulmuştur. Kaçmaz, 2019 çalışmasında parametrik tasarım mimari tasarım sürecinde YBM in proje yönetimine, parametrik tasarım sonucunda elde edilen ürün veya mimari yapım uygulamasında, projelendirmesinde YBM' nin avantajlar ve dezavantajlar incelemiştir. Akıllı nesnelerin içerisindeki parametrelerin ve hesaplamalı tasarım parametrelerinin birlikte kullanılmasıyla ortaya çıkan hesaplamalı BIM kavramı ele almıştır. Karadoğan, 2021 çalışmasında metro istasyonları için üretken tasarım metodlarından faydalanarak mekân analiz edebilmeyi sağlayan sayısal bir tekniğin oluşturulması ile mekân diziminin oluşturulmasında kullanılan algoritma yaklaşımını açıklamaya çalışmıştır.

Literatür araştırıldığında YBM kullanılarak genellikle üst yapı (bina modelleri), peyzaj projelerinin modellemesi, tarihi yapıların modellenmesi, su-elektrik şebeke modellemesi, 3B kent modellemeleri yapıldığı görülmektedir.

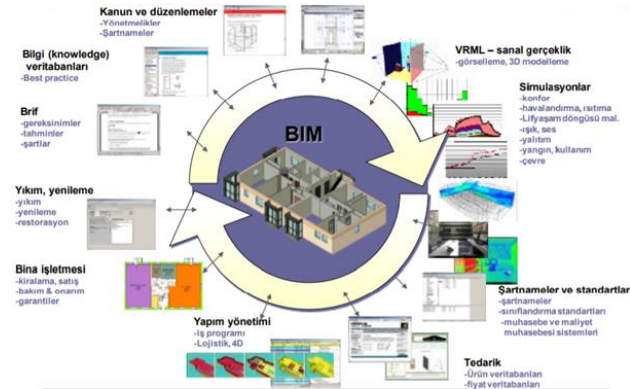
YBM içindeki inşaat verileri birleştirilmiş çok kaynaklı verilerin kullanılması da dahil olmak üzere, üstyapı uygulamaları için çok fazla seçenekler bulunmaktadır (Chapman ve diğ., 2020; Zhang ve diğ., 2018). Fakat geoteknik yapılar ve uygulamalar için neredeyse hiçbir çalışma yoktur.

Bu çalışma, geoteknik yapılar ve diğer yapılar hakkındaki bilgilerin IFC tabanlı programlarla veri alışverişi sonucu 3B olarak daha yararlı ve etkili bir tasarım oluşturmayı ve bunları uyumlu bir şekilde kullanılabilirliğini göstermeyi amaçlamaktadır. Böylece oluşabilecek çakışma kontrolü,

komşu yapıların birbirlerine olan etkileri vb. gibi konular proje aşamasındayken fark edilip düzeltilecek ve eksiklikler giderilerek yeni detaylı bir analiz hızlı bir şekilde oluşturulabilecektir. Ayrıca yönetmelikte (LOD standartları ile ilgili yönetmelikler, TBDY2018, BS EN ISO 19650 serileri vs.) belirtilen şartların kontrolü sağlanacaktır ve gelecekte ihtiyaç duyulması halinde bakım için YBM tabanlı IFC dosyası tüm yapı elemanları (geoteknik yapılar, üstyapılar ve diğer altyapılar) için hazır olacaktır. Ayrıca riskler en aza indirilecek ve gömülü altyapılar da dahil olmak üzere geoteknik yapıların sürdürülebilirliği ve kullanılabilirliği arttırılacaktır. Bu hedeflere YBM teknolojisinin geoteknik yapılara IFC tabanlı uygulanmasıyla ulaşılabileceği de çalışma kapsamında gösterilmiştir. Bu çalışma YBM'yi ve son yıllarda belirgin bir gelişme kaydeden geoteknik yapıların IFC tabanlı veri alışverişi stratejisini kısaca açıklamaktadır. Mevcut veriler ve zemin koşullarına dayalı olarak geoteknik yapıların da dahil olduğu bir YBM'nin temelini oluşturulması amaçlanmaktadır.

YAPI BİLGİ MODELLEME

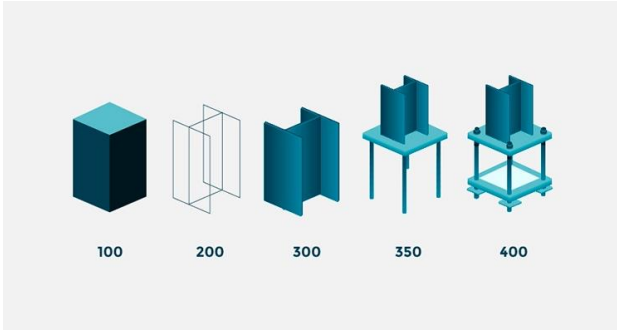
YBM kavramı, yalnızca 3B bir geometriyi değil, aynı zamanda yapının tüm kullanım ömrü boyunca tasarımdan, kullanım ve yapı sökülümüne kadar tüm yapının bilgileri içeren parametrik unsurların kullanımına dayanan bir metodoloji ve çerçevedir (Gondar ve diğ., 2019). Şekil 2; tasarım, yapım süreci, işletme, bakım ve hatta yıkıma kadar bir yapının tüm yaşam döngüsü boyunca YBM kullanımını göstermektedir.



Şekil 2. Altyapı projesi yaşam döngüsünde YBM (Işın ve Pehlevan, 2016).

Parametrik ifadeden tamamen birbirlerine bağlı özelliklere sahip ve tüm elemanları ifade eden bir yaklaşım olarak ifade edilmektedir. YBM'nin sağladığı avantaj bilgilerin geometrik ve alfa sayısal olarak veri tabanında tutulmasıdır. Bu sayede tüm öğeler ve nesnelere herhangi bir zamanda görüntülenmek üzere modelde saklanabilir. Örneğin kentsel alanlarda YBM ile oluşturulmuş altyapı sistemine ait bilgiler gelecekte inşa edilebilecek diğer yapı sistemleri ile bir bütün olarak analiz edilerek tasarlanabilir. (Bui et. al., 2024)

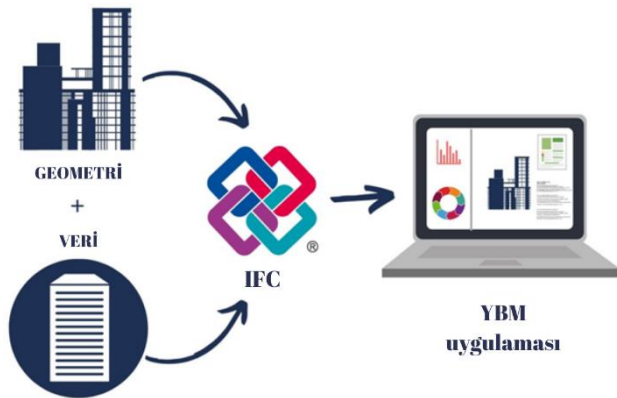
YBM modelleri bilgisayar destekli tasarım(BDT) programlarının aksine çizgilerle değil yapı elemanları ile oluşturulmuştur. Böylece YBM' de süreç kavramı geleneksel BDT programlarındaki iki boyuttan üç boyut elde etme şeklinde değil üç boyuttan iki boyutlu paftalar elde etme şeklinde olmaktadır. YBM modelleri kendilerine ait özellikleri bünyelerinde barındıran ve kendilerini bilen akıllı parametrik nesnelere sahiptir. Parametrik ifadesinden birbirlerine bağlı özelliklere sahip elemanlar ifadesi anlaşılmaktadır. Akıllı nesnelere ise örneğin bir duvarın konumu değiştirildiğinde duvar üzerindeki nesnelere akıllı nesnelere olarak davranmakta ve duvardaki konumunu bilerek duvarla birlikte yer değiştirmektedir. YBM' de Model Tanım Düzeyi - Level of Definition, Model Detay düzeyi - Level of Detail, Model Gelişim Düzeyi - Level of Development kelimeleriyle ifade edilen, LOD Kavramı; YBM model elemanlarının, projenin gelişim sürecinde tasarımdan inşaat aşamasına kadar, hangi aşamalarda hangi seviyede ne kadar içerikle tanımlanacağını belirtir. Elemanların içermesi gereken geometrik ve bilgi içeriklerinin seviyesi LOD numaraları ile tanımlanmaktadır. Örneğin Şekil 3 Model Gelişim Düzeyi (Level of Development) açısından LOD kavramını açıklamaktadır. Burada LOD100 ön tasarım aşaması olarak ifade edilir. LOD100 elemanı yükseklik, alan ve hacim gibi parametrelerin tanımlandığı kavramsal bir modeldir. Bu aşamadaki bilgiler yaklaşık olarak kabul edilir. LOD200 şematik tasarım aşaması olarak ifade edilir. LOD200 şekiller, boyutlar, konumlar vb. gibi geometrik özellikleri gösterir. LOD200' deki karmaşıklık düzeyi LOD100' dekinden biraz daha fazladır. Ayrıca bazı geometrik olmayan bilgileri de içerebilir. Bu aşamadaki bilgiler de yaklaşık olarak kabul edilir. LOD300 yapının detaylı tasarım aşaması olarak ifade edilir. LOD300'ün grafik gösterimi LOD200' ün grafik gösterimi ile aynı olabilir. Ancak LOD300' ü LOD200' den farklı kılan, bu aşamadaki geometri ve özelliklerin kesin olarak kabul edilmiş olmasıdır. Bu aşamadaki bilgiler inşaat aşamasında kullanılabilir. LOD350 inşaat aşamasının uygulanması için gerekli olan dokümantasyon aşamasını ifade eder. LOD350' de elde edilen bilgiler LOD300' de elde edilen bilgiler ile aynıdır. Ancak bu aşamada bağlantılar ve destekler gibi diğer yapı bileşenleri ile etkileşimde olan ara yüzler de dahildir. Modelin etkileşimde olduğu diğer yapı bileşenlerinin nasıl kurulabileceğini ve diğer yapıların sistemleriyle nasıl etkileşime girdiğini gösterir. LOD400 yapım aşaması olarak ifade edilir. Bileşenlerin imalat ve montajı gibi detayları içerir. Bu aşama görsel olmayan bilgileri de içerebilir (Mayouf ve diğ., 2024; Boje ve diğ., 2023; Oretto ve diğ., 2023).



Şekil 3. Model gelişim düzeyinin örnek bir kolon üzerinden gösterimi

ENDÜSTRİ TEMEL SINIFLARI (INDUSTRY FOUNDATION CLASSES, IFC)

YBM programları ve hesaplama programları arasında bilgi alışverişi yapabilmek için farklı yazılımlara ihtiyaç duyulmuştur. Geometrik hesaplama programları ile görsel gösterim programları arasında transferi gerçekleştire bilmek için Endüstri temel sınıfları (Industry foundation classes, IFC) oluşturulmuştur. IFC birlikte çalışabilirliğin sağlanması için mimarlık, mühendislik ve inşaat endüstrisinde kullanılan farklı bilgisayar programları arasında veri alışverişinin gerçekleştirilmesi için BuildingSmart tarafından geliştirilmiş uluslararası bir standarttır. (Köseoğlu ve diğ., 2018; Raza ve diğ., 2023) BuildingSMART, eski adıyla International Alliance for Interoperability (IAI), inşaat endüstrisinde kullanılan yazılım uygulamaları arasındaki bilgi alışverişini geliştirmeyi amaçlayan uluslararası bir kuruluştur. IFC tek bir satıcı veya satıcı grubu tarafından kontrol edilmeyen, platformdan bağımsız, herkes tarafından kullanılabilen ve uygulanabilen açık dosya (açık kodlu) formatı olarak tanımlanmış ve birçok program tarafından desteklenmektedir. (Laakso ve Kiviniemi, 2012) IFC diğer değişim standartlarının aksine modellerle ilgili geometrik ve alfa sayısal bilgiler içeren bir standart olup IFC'nin genel yapısı Şekil 4'de gösterilmektedir. IFC'nin içeriğinde ilgili yapı elemanlarına atanmak üzere geometrik ve alfa sayısal bilgiler içeren birçok sınıf bulunmaktadır.



Şekil 4. IFC ile veri akışı(IFC, 2022)

Mevcut IFC şeması, bir binanın yaşam döngüsü boyunca oluşturulan ve değiş tokuş edilen tüm bilgileri kapsamaz. Bu nedenle araştırmacılar Mimarlık, Mühendislik ve

İnşaat (AEC) endüstrisi ihtiyaçlarına dayalı olarak IFC formatını genişletip yeni tanımlar geliştirmek için çalışmaktadır. Bu çalışmalara örnek olarak, proje tahmini ve çizelgeleme için önerilen genişletmeler, inşaat proje yönetimi, yapısal analiz, nD modelleme uygulamaları, maliyet tahmini, prekast cephelerin ve prekast beton elemanların modellenmesi, yol yapı elemanları ve hasarlı bina bileşenleri sayılabilir(Froese ve diğ., 1999; Weise ve diğ., 2003).

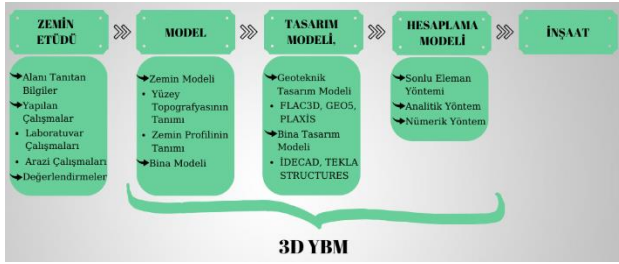
IFC standardını genişletmek için üç yöntem kullanılabilir: (1) özellik kümelerini veya türlerini kullanmak, (2) proxy öğelerini kullanmak, (3) yeni varlıkları veya türleri tanımlamak. Birinci yöntem, IFC standardında tanımlanan varlıklarda IfcPropertySet sınıfının altına metin biçiminde fazladan bilgi eklemektir (Shalabi ve Turkan, 2017). Literatürdeki çalışmaların çoğunda bu yöntem kullanılmıştır. Örneğin, fore kazık verileri YBM yaşam döngüsünde Ifcpile sınıfında bir IfcPropertySet olarak temsil edilir. Bu yöntem, yeni sınıfa benzer bir amaca hizmet eden mevcut bir IFC sınıfı olduğunda tercih edilir. Tüm ilişkiler zaten mevcut sınıf içinde tanımlı olduğundan, tek gereklilik kullanım amacına göre IfcPropertySet sınıfını kullanarak ek metin bilgisi eklemektir. İkinci yöntem, IfcBuildingElementProxy gibi proxy öğelerini kullanarak yeni bir sınıf oluşturmaktır (Motamedi ve diğ., 2016). Proxy ögesi, diğer varlıklar, boşluklar, aktörler ve özellik kümeleriyle ilişkilendirilebilecek yeni varlıklar eklenmesine izin verir. Bu nedenle, mevcut IFC standardı, gerekli unsuru ve ilgili bilgileri temsil etmek için kullanılabilir benzer bir amaca hizmet eden bir varlık içermediğinde bu yöntem tercih edilir. Bu yöntem kullanıldığında, yeni sınıfın diğer elemanlar ve boşluklarla gerekli ilişkilerinin tanımlanması gerekir. İlgili metin verileri yine de IfcPropertySet kullanan ilk yöntem kullanılarak temsil edilir. İkinci yöntemi uygulamak için, EXPRESS dil biçiminde oluşturulan IFC dosyasının bir metin düzenleyici kullanılarak manuel olarak değiştirilmesi gerekir. Son olarak, üçüncü yöntem yeni varlıklar veya türler tanımlamaktır; ancak bunlar en az iki yıl sürebilen BuildingSmart tarafından resmi olarak onaylanmalıdır. Bu nedenle, bu üçüncü yöntem, IFC'yi genişletmek için pratik bir yaklaşım değildir.

GEOTEKNİK YAPILAR İÇİN ENTEGRE YBM

Günümüzdeki birçok yeni yapı, görsel ve geometrik bilgilerini içeren bir son modele sahiptir. Son zamanlarda YBM yaygınlaşması ile de 3B modelleri bile mevcuttur. (Liu ve diğ., 2016) Buna karşılık çoğu YBM modeli, yapının inşa edildiği çevredeki zemin koşulları, gömülü altyapı (doğal gaz boru hattı, elektrik hattı ve su hattı vb.) ve geoteknik yapılar hakkında detaylı bilgi eksikliği mevcuttur. Bu nedenle hem yerüstü hem de yeraltı yapı ve elemanları hakkında bilgi içerecek şekilde hazırlanmış bir YBM, tüm elemanlar için gelişmiş planlama ve mühendislik analizlerine olanak sağlayacaktır.

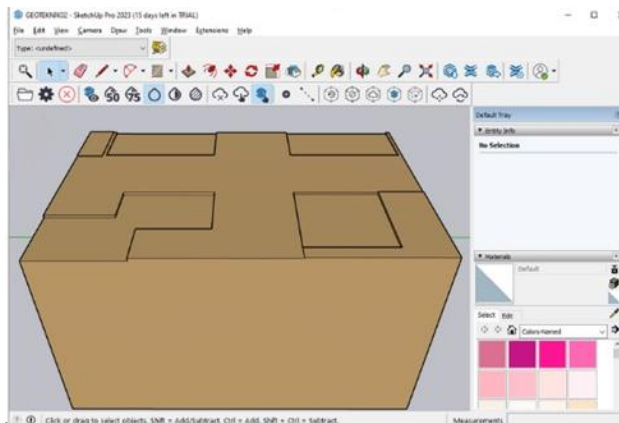
Bu çalışmada geoteknik elemanların bazılarının modellenmesi yapılarak YBM modelleri ile sağlanan bilgilerin eksikliği giderilmeye çalışılmış ve veri alışverişi

ile ilgili çeşitli konulara değinilmiştir. YBM' nin geoteknik açıdan uygulama metodolojisi Şekil 5 gösterilmiştir.



Şekil 5. Geoteknik açıdan YBM metodolojisi

Haritalama araştırmalarında elde edilen gömülü altyapı bilgileri, bütüncül bir 3B genel altyapı görünümü oluşturmak için inşası planlanan yapının YBM modeline eklenmelidir. Ayrıca daha tutarlı bir model oluşturmak için modele jeolojik ve zemin koşulları da eklenmelidir. Bu jeolojik bilgi inşası planlanan yapının bulunduğu sahanın zemin etütlerinden elde edilen bilgilerdir. Ayrıca sahanın farklı konumlarından alınan sondaj sonuçları yardımıyla 3B jeolojik model oluşturulabilir. Sondaj sonuçları kullanılan aletlere, yöntemlere ve kişiye bağlı belirsizlikler içerir. Dolayısıyla oluşturulacak jeolojik model de bir takım belirsizlikler içerecektir. Bunun için deneyimli jeologlar ve geoteknik mühendislerinden yardım alınabilir. Bu durum, jeolojik zemin modellerinde veya entegre edildikleri YBM modellerinde dikkate alınması gereken son derece faydalı bir husustur. Ancak YBM tabanlı böyle bir entegrasyon geliştirmeye açık ve yapılması gereken bir eksikliklerdir. Gerekli bilgiler YBM ortamına dahil edildikten sonra belirli analizleri gerçekleştirmek için diğer yazılım paketleriyle daha dinamik bir şekilde kullanılabilir. Bu yazılımlar görselleştirme ve gelecekte kullanım için tekrar YBM ortamına aktarılabilir (Huang ve diğ., 2022). Şekil 6, yeraltı jeolojisi ile YBM çerçevesinde tutulacak bilgilerin görselleştirilmesini IFC tabanlı Sketchup yazılımı aracılığıyla göstermektedir.

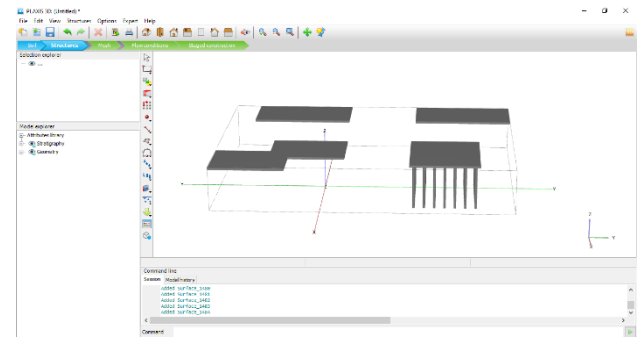


Şekil 6. Yeraltı jeolojik bilgilerini içeren YBM

YBM'nin geoteknik alanına uygulanması çok fazla görülen bir durum olmasa da YBM bünyesindeki tünel imalatları gibi bazı çalışma verilerin geoteknik verilere entegre edilmesiyle altyapı uygulamalarını YBM ile yönetmek için umut verici seçenekler bulunmaktadır

(Valeria ve diğ., 2019). Bu çalışmada sunulan benzer geoteknik veri depolama ve modelleme uygulamaları için de çalışmalar bulunmaktadır (Fabozzi ve diğ., 2021). Buna karşılık uygulanan durum için diğer yazılım paketleri arasında ara yüz görevi görebilecek kapsamlı bir görselleştirme aracı olarak Sketchup programı kullanılmaktadır. Altyapı ve üst yapı bilgileri 3B katı nesnelere olarak Sketchup yazılımı üzerinden hazırlanmıştır. Oluşturulan 3B katı elemanlar ait oldukları IFC sınıfları atanarak YBM ortamında görüntülenmiştir.(Şekil 6)

PLAXIS3B programı çalışma prensibi sonlu elemanlar yöntemine dayanmakta olup, yüzeysel temeller, derin temeller, zemin çivili şevler, zemin ankrajlı perde duvarlar gibi birçok geoteknik problemlerin çözümünde kullanılabilir. PLAXIS3B bir tasarımcının işini önemli ölçüde basitleştiren ve aynı zamanda mühendislik disiplini çerçevesinde gerekli tüm kriterlere uyulmasını sağlayan bir uygulama yöntemi sunar. Sketchup kullanımı kolay, sade bir ara yüze sahip, 3B görselleştirmeler sağladığı ve oluşturulan herhangi bir modeli IFC formatına dönüştürebildiği için sunulan örnekte altyapı ve üst yapıların oluşturulmasında kullanılmıştır. Geoteknik yapıların yapısal analizinde kullanıcı dostu kullanımı kolay ve oluşturulan herhangi bir modeli IFC formatında içe aktarabildiği için PLAXIS3B programı kullanılmıştır. Böylece Sketchup'dan altyapı ve üst yapı, modellendikten sonra geoteknik yapıların yapısal analizi PLAXIS3B ile sağlanmıştır. PLAXIS3B modellenen geoteknik elemanlar açık kodla IFC formatında görülebilecek şekilde kodlanarak YBM programlarında görünür hale getirilmiştir. (Şekil 7)



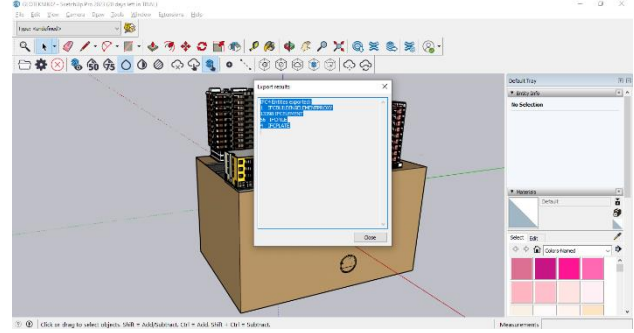
Şekil 7. PLAXIS3B ortamına IFC ile aktarılmış kazık grubu ve radye temeller

Kent nüfusunun hızla artmasıyla altyapı hizmetlerine duyulan ihtiyaç artmıştır. Yerleşim alanlarında boş arsaların giderek azalması, maliyetin artması ve imar yönetmeliklerinin zemin üstündeki yapı hacimlerini sınırlaması, mevcut arazilerde sınırlı alanlara olan ihtiyacı arttırmıştır. Böyle sınırlı alanlar nedeniyle yapıların modellenememesi için inşa edilecek yapının diğer yapılarla etkileşimini dikkate alan 3B modellere ihtiyaç vardır. Bunlar ilgili idareden ayrı ayrı temin edilerek Sketchup gibi yazılımlarda hazırlanabilir. Hazırlanan bu modeller ilgili IFC sınıflarına atandıktan sonra sayısal analiz yazılımlarına (PLAXIS3B) aktarılarak problemin analizi bir bütün olarak sağlanabilir. Analizin ardından değiştirilmesi gereken bilgiler güncellenir ve ayrı modeller

tekrar bir bütün olarak YBM ortamında birleştirilebilir. Bu güncellenmiş bilgiler uygulanan yöntem doğrultusunda çeşitli şekillerde saklanabilir. Alternatif olarak, inşa edilmiş yapı da dahil olmak üzere yapının bulunduğu bölge içerisinde bir bölüm olarak depolanabilir. Ayrıca yeni bir yapının inşa edilmesiyle meydana gelen değişiklikleri belirten yeni bir bilgi katmanı olarak saklanabilir. YBM ortamına bir bütün olarak aktarılan son model diğer programlardaki tüm bilgileri içerir. Böylece son modelde farklı geoteknik yapıların analizi ve tasarımı çevredeki daha önce inşa edilmiş bina modelleri, elektrik-su-doğal gaz hat modelleri göz önünde bulundurularak tasarlanmış olur.

Bina modellerine kıyasla belirsizlikler genellikle yeraltı yapıları ve ortamlarıyla ilişkilidir. Bu belirsizlikler genellikle bilgi eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Bu belirsizliklere jeolojik yorum, parametreler ve zemin özelliklerinin konumsal değişkenliği örnek verilebilir. Bu belirsizlikler uygulanan yöntem içinde YBM bünyesinde belirli bir ögeye ait ek özellik veya YBM modelinde yeni bir bilgi katmanı olarak oluşturulabilir. Örneğin sondaj sonuçlarına bağlı olarak zemin özellikleri konumsal bir belirsizliğe sahip olabilir. Yani sondaj yapılmayan bir bölgede belirsiz bir zemin katmanı mevcut olabilir ve bu durum sayısal analiz sonuçlarını olumsuz etkileyebilir. Bunun için bu bilgiler daha sonra sayısal analiz programında (PLAXIS3B) parametrik girdi olarak kullanılabilir. YBM bünyesindeki elemanlar bu belirsizliği ek özellikler olarak dahil edilebilir. Sonuç olarak bu bilgiler gelecekte projeler veya mevcut bir projeye eklenmesi için gerekli olduğunda mühendislik kararlarının daha kolay verilebilmesini sağlar.

PLAXIS3B de sayısal analizi yapılan model YBM yazılımı olan Sketchup'da toplanıp 3B olarak gösterilmiştir. Oluşturulan kentsel alanda yüzeysel ve derin temel sistemine sahip bina modelleri ve derinlerden bir metro hattının söz konusu olduğu durum YBM yazılımları arasındaki veri alışverişi sağlanarak bu makalede sunulmaktadır. Bu örnekte, mimari bir YBM yazılımı olan Sketchup'da oluşturulan modelin geoteknik sayısal analiz yazılımına (PLAXIS3B) aktarılması durumu incelenmiştir. Burada 3B katı nesnelere YBM yazılımları arasındaki karşılığı ve veri transferi yapılmıştır. YBM yazılımları ele alınarak Sketchup ve geoteknik sayısal analiz yazılımı (PLAXIS3B) arasındaki veri transferi gerçekleştirilmiştir. Makalede derin kazı uygulamasında, Sketchup ve PLAXIS3B arasındaki veri alışverişi ile ilgili genel anlamda uygulanan yöntemin aşamaları sunulmaktadır. Bu örnekte, çevredeki yapılar(Binalar, işyerleri vb.) ve altyapılar(Yollar) Sketchup'da modellenmiştir. Daha sonra bu modeller IFC aracılığıyla PLAXIS3B ortamına aktarılarak veri transferinde yaşanan sorunlar ele alınmıştır.(Şekil 8)



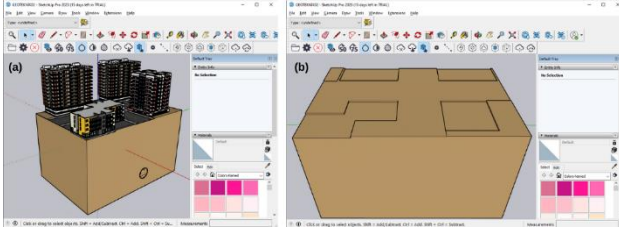
Şekil 8. Kazık grubu ve radye temellerin IFC ile dışarıya aktarılması

GEOTEKNİK YAPILARIN IFC ARACILIĞI İLE 3 BOYUTLU YBM GÖSTERİLMESİ

Yeni inşaatlar için farklı disiplinler tarafından tasarlanan altyapı ve üstyapı modellerinin YBM ortamında birleştirilmesi ve bunun kullanılabilmesi için veri transferinde yaşanan aksaklıkların en aza indirilmesi gerekir.

IFC'de tasarlanan geometrik elemanlar ISO 10303-42 standardında tanımlanmıştır. Bu elemanlar, nesnelere 2 (eğri: IfcCurve, yüzey: IfcSurface vb.) ve 3 boyutlu (katı cisim modeli: IfcSolidModel) biçimde tanımlanmasına olanak verir. Burada geometriler yüzeylerin birleşiminden meydana gelmektedir. Bu durum görselleştirmeye dayalı Sketchup gibi yazılımlarda kolaylıkla gösterilebilmektedir. Fakat, analiz yazılımları olan plaxis yazılımları arasında veri değişiminde aktarma problemleri oluşmaktadır. Plaxis gibi analiz yazılımlarında cisimler üç boyutlu katılar olarak modellenmekte ve malzeme özellikleri ile tanımlanmaktadır. Plaxis yazılımında zemin içi dolu homojendir(her noktasında aynı özellikleri gösteren) ve yazılımın çözüm stratejisine bağlı olarak mesh adı verilen parçalara ayrılmıştır. Görsel bir yazılım olan BlenderBIM veya Sketchup'da geoteknik sonlu eleman yazılımı olan plaxis yüzeylerin birleşimi ile oluşturulmuş üç boyutlu nesne olarak aktarıldığından IFC dosyası olarak ayrıca kodlama gerekmektedir. Çünkü zemin üç boyutlu içi dolu bir kesit iken sonlu eleman yazılımı olan plaxis'a aktarılan üç boyutlu nesne yüzeylerden oluşan içi boş üç boyutlu bir nesne olarak geçmektedir. Endstüri temel sınıfları başlığında da bahsedildiği gibi IFC standardının genişletilme yöntemlerinden kullanılmalıdır.

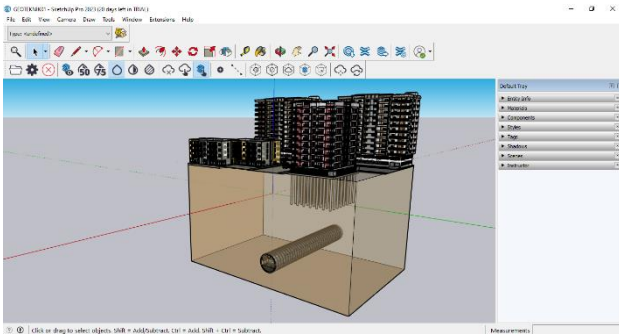
Bu bölüm mimari bir YBM programından geoteknik yapısal analiz programına veri aktarımını yapılmıştır. Şekil 9(a) YBM dosyasındaki binalar ve jeolojik bilgiler dâhil olmak üzere 3B şehir planını ve Şekil 9(b) YBM dosyasında temeller için kazı sahasını göstermektedir. Model komşu binalar ve yeraltı jeolojik bilgilerin YBM'sini içermektedir.



Şekil 9.(a) YBM dosyasındaki binalar ve jeolojik bilgiler dahil olmak üzere 3B şehir planı **(b)**YBM dosyasında temeller için kazı sahası.

Modele dâhil edilen 3B zemin tek tip iyi derecelenmiş sıkı kumlu zemindir. Altyapı temel sistemi ile birlikte YBM dosyası IFC ortamında oluşturulmuştur (Şekil 8). Şekil 9(a)'daki birleşik model aynı zamanda altyapı hizmet ağı altyapısıyla birlikte üstyapıyı da içeren tipik bir kentsel alan örneğini göstermektedir. Bu model YBM bilgilerini içerecek şekilde IFC oluşturulmuş ve daha sonra Sketchup görselleştirme ortamında 3B olarak oluşturulmuştur.

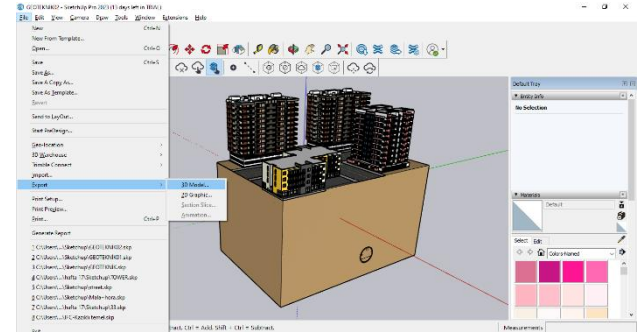
Sketchup' da oluşturulan modelin yapı elemanlarına (kolon, giriş, temel, kazık) ilgili IFC sınıfları atanmıştır (Şekil 10). Bu atama işleminde zemin herhangi özel bir elemana ait olmayan ve genel bir sınıf olan IFCBUILDINGELEMENTPROXY sınıfına, yerleşim yeri kesitinde yer alan 4 adet binaya ait temeller radye temel olarak atanmıştır. Bu atama işlemi için açık uçlu IFC programında dosya oluşturularak IFCPLATE sınıfı oluşturulmuştur. Kazık grubu ise bu elemanlar için özel olarak bu çalışma kapsamında geliştirilmiş ve IFCPILE sınıfı olarak atanmıştır. Bu elemanlar ise düzlem yüzeylerden oluşan 3B katı nesnelere atama işleminin ardından Şekil 11'deki gibi Sketchup'un dışa aktarma özelliğinden kayıt türü IFC seçilir ve IFC dosyası eklenecek 3B model oluşturulur.(Şekil 10)



Şekil 10. Geoteknik modelde içeren IFC sınıfları atanmış 3B modelleme.

Oluşturulan IFC dosyası PLAXIS3B geoteknik yapısal analiz yazılımında içe aktarılacak üzere import edilir. PLAXIS3B henüz BIM sistemi açısından geliştirilme aşamasında olduğu için belirli IFC sınıflarını içe aktarabilmektedir. Bunlar radye temel için olan IFCPLATE ve kazık grubu için olan IFCPILE'dir. (Şekil 7). Oluşturulan diğer IFC sınıfları ise içe aktarılmamıştır. Sketchup yazılımındaki 3B katı nesne oluşturulma mantığı ile PLAXIS3B yazılımında 3B katı nesne oluşturulma mantığı birbirinden farklıdır. Örneğin yapı elemanları Sketchup yazılımında düzlem yüzeyler ile çevrili iken

PLAXIS3B yazılımında tek bir düzlem elemana kalınlık atanarak oluşturulmaktadır. Bu nedenle veri aktarımı sırasında bu tür geometrik sorunlarla karşılaşmıştır. Ayrıca aktarılan model üzerinden doğrudan yapısal analiz yapılmamakta ve birçok değişiklik gerekmektedir.



Şekil 11. Sketchup dışa aktarma özelliği

İlgili yazılım programları arasındaki veri alışverişi IFC ile sağlanmıştır. Modele ait bilgilerin veri alışverişi sırasında kaybolmaması için bilgilerin (geometrik ve alfa sayısal) ilgili IFC sınıflarına atanması gerekmektedir. Bu atama Sketchup yazılımında ilgili elemanların ait oldukları kendi sınıflarına karşılık gelecek şekilde belirlenmiştir. Buna karşılık belli bir IFC sınıfına ait olmayan elemanlar IFCBUILDINGELEMENTPROXY sınıfına atanmıştır. Bu atama işleminde gerekli IFC sınıflarının bulunmaması veya IFC sınıflarında yeterli özellik setlerinin var olmaması durumunda EXPRESS veri modelleme dili sayesinde IFC standardının genişletilmesi sağlanmıştır.

Bu makalede incelenen sınırlı alandaki kentsel alanın geoteknik açıdan YBM' nin IFC tabanlı veri alışverişi sağladığı ve bu işlem şekillerde gösterilerek ortaya konmuştur. Bu durum mimari bir program olan Sketchup yazılımından geoteknik sayısal analiz yazılımı olan PLAXIS3B'ye veri alışverişi açısından incelenmiştir. Burada YBM yazılımları arasındaki veri alışverişi sırasında 3B katı modelleme kuralları ve desteklenen IFC sınıfları vb. gibi konular önem arz etmektedir. Bu durumun yaygınlaşması sağlanarak daha genel anlamda karmaşık problemlerin çözülebilmesi için veri alışverişi şehir modellerinden geoteknik programlarla sağlanabilecektir. Verilerin kolayca erişilebilir bir ortamda bulunması herhangi bir yeni yapı yapılması veya mevcut yapılarda değişiklik yapılması durumunda karar verme süreçlerinde kolaylık sağlayacaktır.

DEĞERLENDİRME ve SONUÇ

YBM üstyapılar (bina modelleri ve kent modelleri) için oldukça gelişmiş teknolojiler içerir. Ancak böyle bir uygulama geoteknik yapılar için oldukça sınırlıdır. Altyapılar özellikle kentsel alanlarda planlama ve tasarıma yardımcı olacak önemli yapılardır. Hem üstyapı hem de geoteknik yapı koşullarını kapsayan YBM yazılımları arasındaki veri alışverişi bu çalışmada uygulanmıştır.

Zemin koşullarındaki belirsizlikler nedeniyle ve buna bağlı olarak altyapı ortamları hakkındaki açık bilgiler olmaması nedeniyle altyapı ortamları için YBM oluşturmak zordur. Bu zorluklara bir altyapı inşası söz

konusu olduğunda diğer yapılar ile etkileşimlerini dikkate alacak şekilde altyapıların doğru konumunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada geoteknik modeller için oluşana belirsizlikleri gidermek için EXPRESS veri modelleme dilinde geoteknik elemanları göstermek için kod oluşturulup bunun üstesinden gelinebilecek modelleme oluşturulmuştur. Böylece altyapılar ile ilgili konular belirlenip zemin koşulları ile birleştirilerek altyapılar için YBM oluşturulmuştur. YBM yazılımları olan Sketchup (BlenderBIM) ile PLAXIS3B arasındaki veri alışverişi IFC dosyaları ile sağlanmış ve 3B olarak Şekil 10 da gösterilmiştir. IFCPLATE olarak bina temelleri ve IFCPILE olarak kazık temel modelleri oluşturulmuştur. Sonuç olarak geoteknik yapıların YBM de IFC dosyaları ile oluşturulabileceği gösterilmiştir. Kentsel alanlarda bu çalışmada oluşturulduğu gibi tüm modellenmemiş IFC dosyaları oluşturularak alt ve üst yapıdaki tüm elemanlar 3B oluşturulabileceği gösterilmiştir.

Teşekkür ve Bilgi Notu

Makalede ulusal ve uluslararası araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Çalışmada etik kurul izni gerekmemiştir.

Yazar Katkısı ve Çıkar Çatışması Beyan Bilgisi

1. Yazar % 80, 2. Yazar %20 katkıda bulunmuştur. Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır

KAYNAKÇA

- Bayer, S., Yeler, O., & Demirel, F. Ş. (2023). Peyzaj Projelerinin YBM (Yapı Bilgi Modelleme) Desteği ile Tasarlanması: Van YYÜ Örneği. *JENAS Journal of Environmental and Natural Studies*, 5(2), 123-135.
- Berdiglyjov, M., & Popa, H. (2019). The implementation and role of geotechnical data in BIM process. *E3S Web of Conferences*, 85(October 2015), 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198508009>
- Boje, C., Menacho, Á. J. H., Marvuglia, A., Benetto, E., Kubicki, S., Schaubroek, T., & Gutiérrez, T. N. (2023). A framework using BIM and digital twins in facilitating LCSA for buildings. *Journal of Building Engineering*, 76, 107232.
- Bui, H. G., Ninić, J., Koch, C., Hackl, K., & Meschke, G. (2024). Integrated BIM-based modeling and simulation of segmental tunnel lining by means of isogeometric analysis. *Finite Elements in Analysis and Design*, 229, 104070.
- Chapman, D., Providakis, S., & Rogers, C. (2020). BIM for the Underground – An enabler of trenchless construction. *Underground Space (China)*, 5(4), 354–361. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.08.001>
- Christian, J. T. (2004). Geotechnical Engineering Reliability: How Well Do We Know What We Are Doing? *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(10), 985–1003. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2004\)130:10\(985\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:10(985))
- Fabozzi, S., Biancardo, S. A., Veropalumbo, R., & Bilotta, E. (2021). I-BIM based approach for geotechnical and numerical modelling of a conventional tunnel excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108(October), 103723. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103723>
- Uray, F., Varlık, A., & Metin, A. (2018). Üç boyutlu kent modellerinde ayrıntı düzeyi kavramı İnce Minareli Medrese (Konya) örneği. *Geomatik*, 3(1), 74-83.
- Froese, T. M., Materials, B., & On, O. (1999). Industry Foundation Class Modeling for Estimating and. *Durability of Building Materials*, 2825–2835. <http://itc.scix.net/data/works/att/w78-1999-2825.content.pdf>
- Gondar, J., Pinto, A., & Fartaria, C. (2019). The use of BIM technology in geotechnical engineering. *17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2019 - Proceedings, 2019-Septe*. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0530>
- Huang, M. Q., Zhu, H. M., Ninić, J., & Zhang, Q. B. (2022). Multi-LOD BIM for underground metro station: Interoperability and design-to-design enhancement. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 119(October 2021). <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104232>
- Huo, H., Bobet, A., Fernández, G., & Ramirez, J. (2005). Load Transfer Mechanisms between Underground Structure and Surrounding Ground: Evaluation of the Failure of the Daikai Station. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12), 1522–1533. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2005\)131:12\(1522\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2005)131:12(1522))
- IFC. (2022). <https://bimcorner.com/everything-worth-knowing-about-the-ifc-format/>
- ISO 10303-42. (2022). Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 42: Integrated generic resource: Geometric and topological representation, 2022.
- Işın, G., & Pehlevan, E. (2016). *Yapı Bilgi Modellemesi (BIM)* (Issue May 2012).
- Karadoğan, A. (2021). Yeraltı Metro İstasyon Yapılarında Algoritmik Tasarım ile Mekan Yerleşim
- Kaçmaz, Ş. (2019). Parametrik Tasarım ve BIM. *Yapı Bilgi Modelleme*, 1(1), 3-9.
- Karadoğan, A. (2021). Yeraltı Metro İstasyon Yapılarında Algoritmik Tasarım ile Mekan Yerleşim Kararlarının Geliştirilmesi. *Yapı Bilgi Modelleme*, 3(1), 1-11.
- Koseoglu, O., Sakin, M., & Arayici, Y. (2018). Exploring the BIM and lean synergies in the Istanbul Grand Airport construction project. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 25(10), 1339-1354.
- Laakso, M., & Kiviniemi, A. (2012). The IFC standard - A review of history, development, and standardization. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 17(May), 134–161.
- Liu, Z. Q., Zhang, F., & Zhang, J. (2016). The building information modeling and its use for data transformation in the structural design stage. *Journal of Applied Science and Engineering*, 19(3), 273–284. <https://doi.org/10.6180/jase.2016.19.3.05>
- Marache, A., Dubost, J., Breysse, D., Denis, A., & Dominique, S. (2009). Understanding subsurface geological and geotechnical complexity at various scales in urban soils using a 3B model. *Georisk*, 3(4), 192–205. <https://doi.org/10.1080/17499510802711994>
- Mayouf, M., Jones, J., Elghaish, F., Emam, H., Ekanayake, E. M. A. C., & Ashayeri, I. (2024). Revolutionising the 4D BIM Process to Support Scheduling Requirements in Modular Construction. *Sustainability*, 16(2), 476.
- Morin, G. (2017). Geotechnical BIM : Applying BIM principles to the subsurface. *Autodesk University*, 1–10.
- Motamedi, A., Soltani, M. M., Setayeshgar, S., & Hammad, A. (2016). Extending IFC to incorporate information of RFID tags attached to building elements. *Advanced Engineering Informatics*, 30(1), 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.11.004>
- Oreto, C., Biancardo, S. A., Abbondati, F., & Veropalumbo, R.

- (2023). Leveraging Infrastructure BIM for Life-Cycle-Based Sustainable Road Pavement Management. *Materials*, 16(3), 1047.
- Phoon, K. K., Cao, Z. J., Ji, J., Leung, Y. F., Najjar, S., Shuku, T., Tang, C., Yin, Z. Y., Ikumasa, Y., & Ching, J. (2022). Geotechnical uncertainty, modeling, and decision making. *Soils and Foundations*, 62(5), 101189. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101189>
- Phoon, K. K., & Tang, C. (2019). Characterisation of geotechnical model uncertainty. *Georisk*, 13(2), 101–130. <https://doi.org/10.1080/17499518.2019.1585545>
- Raza, M. S., Tayeh, B. A., Aisheh, Y. I. A., & Maglad, A. M. (2023). Potential features of building information modeling (BIM) for application of project management knowledge areas in the construction industry. *Heliyon*, 9(9).
- Shalabi, F., & Turkan, Y. (2017). IFC BIM-Based Facility Management Approach to Optimize Data Collection for Corrective Maintenance. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(1), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000941](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000941)
- Tawelian, L. R., & Mickovski, S. B. (2016). The Implementation of Geotechnical Data into the BIM Process. *Procedia Engineering*, 143(Ictg), 734–741. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.115>
- Valeria, N., Roberta, V., Vittoria, C., Domenico, A., Filomena, S., & Stefania, F. (2019). A new frontier of BIM process: Geotechnical BIM. *Proceedings of the XVII ECSMGE-2019 Geotechnical Engineering Foundation of the Future*. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0682>
- Vaníček, I., Jirásko, D., & Vaníček, M. (2021). Role of Geotechnical Engineering in BIM process modelling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 727(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/727/1/012007>
- Yaylali, G. & Aydar, U. (2022). Yapı Bilgi Modellemesinin Alt Yapı Projelerinde Kullanımı Üzerine Bir Uygulama Çalışması . *Lapseki Meslek Yüksekokulu Uygulamalı Araştırmalar Dergisi* , 3 (6) , 34-43 .
- Wang, H. feng, Lou, M. lin, Chen, X., & Zhai, Y. mei. (2013). Structure-soil-structure interaction between underground structure and ground structure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 54, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.07.015>
- Weise, M., Katranuschkov, P., Liebich, T., & Scherer, R. J. (2003). Structural analysis extension of the IFC modelling framework. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 8(July), 181–200.
- Wu, I. C., Lu, S. R., & Hsiung, B. C. (2015). A BIM-based monitoring system for urban deep excavation projects. *Visualization in Engineering*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40327-014-0015-x>
- Zhang, J., Wu, C., Wang, Y., Ma, Y., Wu, Y., & Mao, X. (2018). The BIM-enabled geotechnical information management of a construction project. *Computing*, 100(1), 47–63. <https://doi.org/10.1007/s00607-017-0571-8>
- Zhu, S., Hack, R., Turner, K., & Hale, M. (2003). How far will uncertainty of the subsurface limit the sustainability planning of the subsurface? *Japanese Journal of Radiological Technology*, 49(5), 785.