Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

GEOTEKNİK PROJE YÖNETİMİNDE DİJİTAL İKİZ TABANLI KARAR DESTEK SİSTEMLERİ

DIGITAL TWIN-BASED DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR GEOTECHNICAL PROJECT MANAGEMENT

Salihcan Karaman[1], Alp Gökalp[2], Şenol Adatepe[3], Ahmet Dinç[4]

ÖZET

Dijital ikiz (digital twin) kavramı, fiziksel varlıkların ve süreçlerin dijital ortamda dinamik bir temsilinin oluşturulmasına dayanır. Bu bildiri, dijital ikiz teknolojisinin geoteknik projelerdeki uygulamasını kuramsal temeller ve gerçek proje örnekleriyle incelemektedir. Öncelikle, dijital ikizin tanımı ve bileşenleri güvenilir akademik literatür ışığında açıklanmaktadır. Ardından, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri'nin (GIS) dijital ikiz oluşturmada oynadığı roller ele alınmış; nesnelerin interneti, bulut bilişim ve makine öğrenmesi gibi yeni teknolojilerle entegrasyon potansiyeli tartışılmıştır. Gerçek proje uygulama örnekleri, dijital ikiz yaklaşımının geoteknik projelerde proje takvimi planlamasından zemin modellemesine, sensör tabanlı izlemeden karar destek sistemlerine kadar geniş bir yelpazedeki katkılarını ortaya koymaktadır. Bu sayede dijital ikizlerin, saha gerçekliği ile proje planlaması arasında bir köprü kurarak dinamik karar alma süreçlerini nasıl kolaylaştırdığı gösterilmektedir. Sonuç bölümünde, dijital ikiz uygulamalarının geleneksel yöntemlere kıyasla sağladığı avantajlar vurgulanmış ve geoteknik mühendisliğinde gelecekteki olası gelişmelere değinilmiştir.
Anahtar Kelimeler: *Dijital İkiz, BIM, CBS, Proje Yönetimi*

ABSTRACT

The concept of a digital twin is based on creating a dynamic representation of physical assets and processes in a digital environment. This paper examines the application of digital twin technology in geotechnical projects through theoretical foundations and real project examples. Firstly, the definition and components of a digital twin are explained in light of reliable academic literature. Subsequently, the roles of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information Systems (GIS) in creating digital twins are addressed, and the potential for integration with new technologies such as the Internet of Things, cloud computing, and machine learning is discussed. Real project application examples reveal the wide-ranging contributions of the digital twin approach in geotechnical projects, from project schedule planning to ground modeling, and from sensor-based monitoring to decision support systems. In this way, it is demonstrated how digital twins facilitate dynamic decision-making processes by bridging the gap between site reality and project planning. In the conclusion, the advantages of digital twin applications over traditional methods are highlighted, and future potential developments in geotechnical engineering are addressed.
Keywords: *Digital Twin, BIM, GIS, Project Management*

[1] Yüksek İnşaat Mühendisi, KASKTAŞ, salihcan.karaman@kasktas.ru (Sorumlu yazar)
[2] Yüksek İnşaat Mühendisi, KASKTAŞ, alp.gokalp@kasktas.com.tr
[3] Yüksek İnşaat Mühendisi, KASKTAŞ, senol.adatepe@kasktas.com.tr
[4] Yüksek İnşaat Mühendisi, KASKTAŞ, ahmet.dinc@kasktas.com.tr

1. GİRİŞ

İnşaat ve altyapı projelerinde dijital dönüşüm, son yıllarda hız kazanan bir olgu olup, proje yönetimi ve mühendislik süreçlerini köklü biçimde etkilemektedir. Özellikle geoteknik mühendisliğinde, zemin koşullarının belirsizliği, verinin çok disiplinli yapısı ve inşaat sürecinin dinamik doğası, planlama ve tasarım aşamalarında karşılaşılan önemli zorluklardandır. Geleneksel yaklaşımda, zemin etütleri, tasarım modelleri, saha izleme verileri ve inşaat programları birbirinden kopuk sistemlerde ele alınmakta; bu da bilgi akışında aksamalara ve karar alma süreçlerinde gecikmelere yol açabilmektedir. Dijital ikiz teknolojisi, tam da bu noktada, fiziksel dünyadaki sistemi dijital ortamda gerçek zamanlı ve bütünleşik bir biçimde temsil ederek bu sorunlara çözüm sunmayı vadetmektedir (Haryono et al., 2022). Dijital ikiz, gerçek ortamdaki bir nesnenin, sürecin veya sistemin sanal bir kopyası olarak tanımlanabilir ve sürekli güncellenen veriler sayesinde fiziksel koşullardaki değişimleri yansıtır (Grieves & Vickers, 2017; Lu vd., 2019). Böylece, tasarımcılar, mühendisler ve yöneticiler, karmaşık sistemleri sanal ortamda gözlemleyip simüle ederek "gerçek zamanlı ve ileri-simülasyon temelli" kararlar alabilme imkanına kavuşurlar (Haryono et al., 2022).

Geoteknik projelerde dijital ikiz uygulamaları, proje paydaşlarına zemin ve yapı etkileşimlerini daha iyi anlama, olası riskleri önceden belirleme ve inşaat sürecini optimize etme olanağı sunar. Örneğin, büyük ölçekli bir kazı projesinde dijital ikiz kullanımı, saha verilerinin anlık takibi ve modele entegre edilmesi sayesinde, tasarım varsayımları ile gerçek saha davranışı arasındaki farkların anında tespitine imkan tanır. Böylelikle "gözlemsel yöntem" olarak bilinen, inşaat esnasında tasarımın sahadan alınan yeni verilere göre uyarlanması yaklaşımı dijital ikiz altyapısıyla daha etkin uygulanabilir hale gelmektedir. Bu çalışmada, dijital ikiz kavramının kuramsal temelleri ve ilgili teknolojiler irdelendikten sonra, yazarın da katkıda bulunduğu bazı geoteknik projelerden örneklerle, dijital ikizlerin pratik uygulamaları ortaya konulacaktır. Özellikle BIM ve GIS entegrasyonunun, sensör verileriyle birleşerek proje planlaması ve saha gerçekliği arasındaki boşluğu nasıl doldurduğu vurgulanacak; makine öğrenmesi ve veri görselleştirme araçlarının bu bağlamdaki potansiyeline değinilecektir. Sonuç kısmında ise dijital ikiz teknolojisinin geoteknik projelerde dinamik karar alma süreçlerini kolaylaştırma ve geleneksel yöntemlere kıyasla verimlilik, güvenlik ve iletişim konularında sağladığı avantajlar özetlenecektir.

2. DİJİTAL İKİZ KAVRAMI VE KURAMSAL TEMELLER

İlk olarak imalat ve havacılık gibi sektörlerde geliştirilen dijital ikiz kavramı, en temel tanımıyla fiziksel bir varlığın veya sistemin yaşam döngüsü boyunca güncel kalan dijital bir temsilidir (Jiang vd., 2021). Bu "canlı" model, fiziksel ikizinden sensörler aracılığıyla topladığı gerçek zamanlı verilerle sürekli beslenir. Bu sayede dijital ikiz, fiziksel sistemin mevcut durumunu anlık olarak yansıtarak davranışlarını taklit eder ve gelecekteki performansının farklı senaryolar altında sanal ortamda test edilmesine ve öngörülmesine olanak tanır.

Dijital ikiz teknolojisinin altyapısını Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zeka ve bulut bilişim gibi teknolojiler desteklerken, inşaat sektöründeki temelini Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS) oluşturur (Leng & Jiang, 2019). BIM'in yapısal verileriyle GIS'in mekansal verilerinin entegrasyonu (Song vd., 2017), fiziksel ve dijital dünya arasında

çift yönlü bir etkileşim kurar: Fiziksel ortamdaki değişimler modeli güncellerken, modeldeki analizler de gerçek dünya için karar desteği sağlar. Bu yaklaşımın; tasarım, inşaat ve işletme süreçlerinde verimliliği artırdığı ve risk yönetimini güçlendirdiği rapor edilmektedir (Lu vd., 2019; Haryono vd., 2022).

3. GEOTEKNİK PROJELERDE DİJİTAL İKİZ ENTEGRASYONU

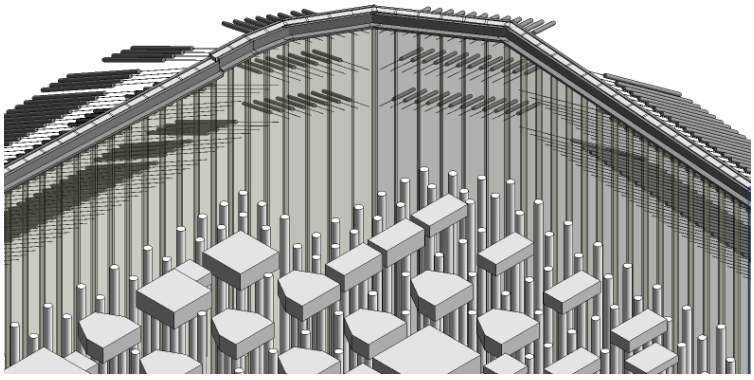
Dijital ikiz teknolojisi, geoteknik projelerde yapısal tasarım modelleri (BIM) ile üç boyutlu zemin modellerini (GIS) birleştirerek zemin-yapı etkileşimini bütüncül bir sanal prototipte yönetir. GeoBIM olarak da adlandırılan bu entegrasyon (Meschini vd., 2022), yeni saha verileriyle (ör. sondaj, kazı gözlemleri) sürekli güncellenen dinamik bir model oluşturur. Bu sayede mühendisler, beklenmedik zemin koşullarıyla karşılaştıklarında tasarımları hızla yeniden analiz edip revize edebilirler. Bu yaklaşım, geleneksel 2B yöntemlere kıyasla %50'ye varan zaman tasarrufu sağlayarak tasarım sürecini önemli ölçüde hızlandırır ve olası sorunlar için "erken uyarılar" sunar (Haryono vd., 2022).

Ayrıca, dijital ikizler, tüm paydaşlar için tek ve güncel bir bilgi kaynağı ("single source of truth") oluşturarak disiplinler arası koordinasyonu güçlendirir. Teknolojinin en önemli faydalarından biri de, sahaya yerleştirilen sensörlerden gelen verileri gerçek zamanlı olarak dijital modele entegre etmesidir. Bu özellik sayesinde dijital ikiz, projenin bir "erken uyarı sistemi" gibi çalışır; deformasyon veya gerilme gibi kritik eşikler aşıldığında otomatik uyarılar üreterek iş güvenliğini artırır ve olası hasarları önler. Böylece dijital ikiz, tasarım optimizasyonundan inşaat yönetimi ve risk izlemeye kadar projenin tüm yaşam döngüsüne yayılan kapsamlı bir iyileştirme sağlar.

4. UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Dijital ikiz yaklaşımının pratikteki faydalarını ortaya koymak amacıyla, yazarın doğrudan yer aldığı bazı geoteknik proje uygulamalarından örnekler bu bölümde sunulmaktadır. Bu örnekler, BIM ve GIS teknolojilerinin entegrasyonu, parametre transferi, veri görselleştirme, inşaat planlaması ve gerçek zamanlı izleme gibi farklı bileşenlerin bir araya gelerek dijital ikiz sistemini nasıl oluşturduğunu göstermektedir. Her bir alt başlık altında, ilgili teknolojinin iş akışına katkısı açıklanmakta ve kullanıcı tarafından sağlanan görsellerle desteklenmektedir.

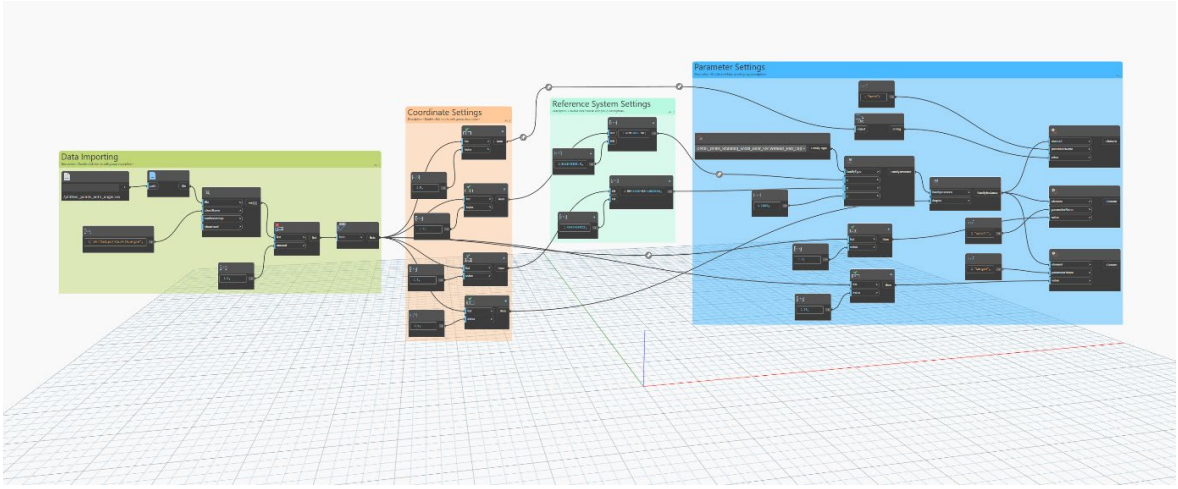
4.1. BIM Tabanlı 3B Modelleme (Revit)



Şekil 1. Bir geoteknik projenin BIM tabanlı 3B modeli (Revit yazılımı ile oluşturulmuş kazık, kazık başlıkları, ankraj ve diyafram duvarı elemanları).

Bu uygulama örneğinde, geoteknik projenin tüm yapısal unsurları Autodesk Revit ortamında detaylı bir şekilde modellenmiştir. BIM tabanlı bu 3B model, derin kazı destek sistemini oluşturan diyafram duvarları, ankrajlar ve kazıkları gerçek boyut ve konumlarıyla dijital ortamda temsil etmektedir. Model içerisinde her bir elemanın geometrik özellikleri (uzunluk, kesit boyutu, kot bilgileri vb.) ve malzeme/performans parametreleri (ör. beton sınıfı, ankraj kapasitesi) tutulmaktadır. Bu sayede proje için tüm yapısal veriler tek bir dijital modelde birleştirilmiş olmaktadır. BIM modelinin sağladığı bu bütüncül yapı, dijital ikizin iskeletini oluşturur ve ilerleyen adımlarda diğer verilerin entegre edileceği temel platform işlevini görür. Geoteknik mühendisliği açısından, Revit gibi bir BIM aracında zemin destek yapılarının modellenmesi, geleneksel 2B çizimlerin ötesine geçerek çok daha zengin bir veri seti sunar: Örneğin kazıkların zemine gömülü derinlikleri, ankrajların eğimleri ve katmanlara göre dağılımı, üç boyutlu olarak netleşir. Bu model, aynı zamanda 4B (üç boyut + zaman) planlama için de kullanılabilecek bir başlangıç noktasıdır; çünkü her bir eleman takvimle ilişkilendirilebilir, bu da inşaatın hangi aşamasında hangi elemanın yerleştirileceğinin modellenmesine imkan tanır. Sonuç olarak, BIM tabanlı 3B modelleme ile geoteknik tasarımın dijital prototipi oluşturulmakta ve dijital ikiz çalışmasının ilk adımı atılmaktadır.

4.2. Parametrik Veri Aktarımı (Dynamo)

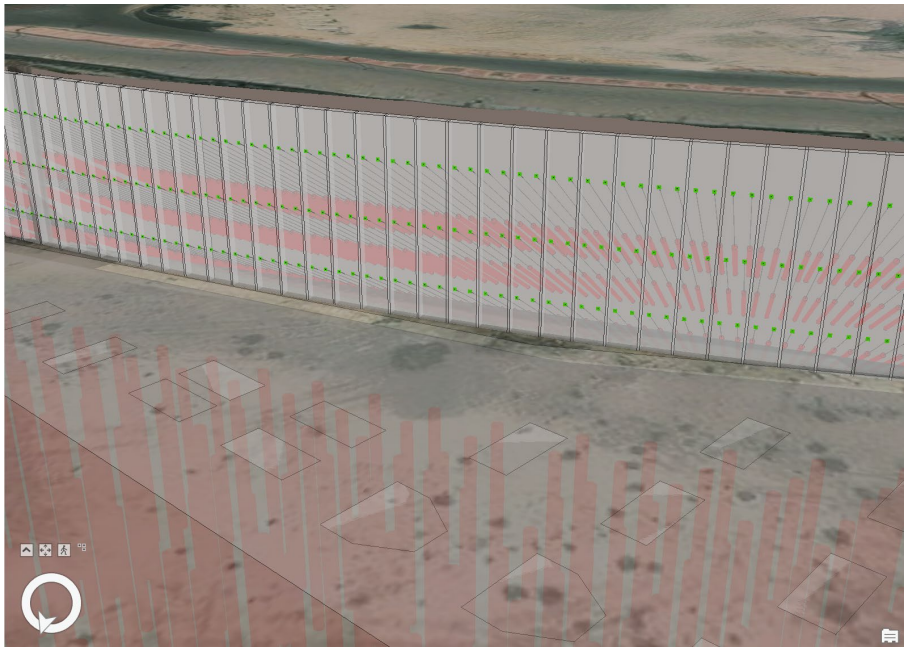


Şekil 2. Revit ortamında Dynamo görsel programlama aracı ile hazırlanan veri aktarım iş akışı (CSV veri girişi, koordinat dönüştürme ve parametre atama adımları görülmektedir).

Bu adımda, BIM modelinin parametrik veri girişine olanak tanıyacak şekilde otomasyonu sağlanmıştır. Autodesk Revit için bir görsel programlama eklentisi olan Dynamo, model ile harici veri kaynakları arasında köprü kurmak amacıyla kullanılmıştır. Şekil 2'de görülen Dynamo betiği, dış kaynaklı bir CSV dosyasından (örn. saha verileri veya tasarım hesap çıktıları) proje modeline veri aktarım adımlarını içermektedir. Bu kapsamda, önce CSV dosyasından kazık ve ankraj gibi elemanlara ait veriler (örneğin koordinatlar, boylar, kod numaraları) Dynamo aracılığıyla okunmuştur. Ardından "Coordinate Settings" ve "Reference System Settings" adı verilen bölümlerde, BIM modeli ile GIS verilerinin ortak bir referans koordinat sisteminde buluşması için gereken dönüşümler gerçekleştirilmiştir. Bu, özellikle BIM modelinin genellikle yerel koordinatlarda, GIS verilerinin ise coğrafi koordinatlarda olması problemine çözümdür. Dynamo betiği, gerekli dönüşüm matrislerini uygulayarak örneğin CSV'deki koordinatları Revit'in proje koordinat sistemine çevirmektedir. Son aşamada ise "Parameter Settings" bölümünde, veri setindeki her bir alan,

Revit modelindeki ilgili nesnelerin parametrelerine otomatik olarak yazılmaktadır. Örneğin, her bir kazık için CSV'de verilen tasarım kotu veya boyu, Revit'te o kazığın parametrik "üst kot" ya da "gömülme derinliği" alanına işlenir. Bu otomasyon sayesinde, insan hatasına açık manuel veri girişine ihtiyaç kalmadan, yüzlerce elemanlık bir modelin güncellenmesi saniyeler içinde gerçekleşmektedir. Sonuç olarak Dynamo kullanımı, BIM tabanlı dijital ikiz modelinin canlı bir veriyle beslenmesini sağlamış ve farklı yazılımlar/formatlar arasındaki veri silolarını ortadan kaldırarak bütüncül bir veri akışı oluşturmuştur.

4.3. 3B Görselleştirme ve Kazı Planlaması (ArcGIS)



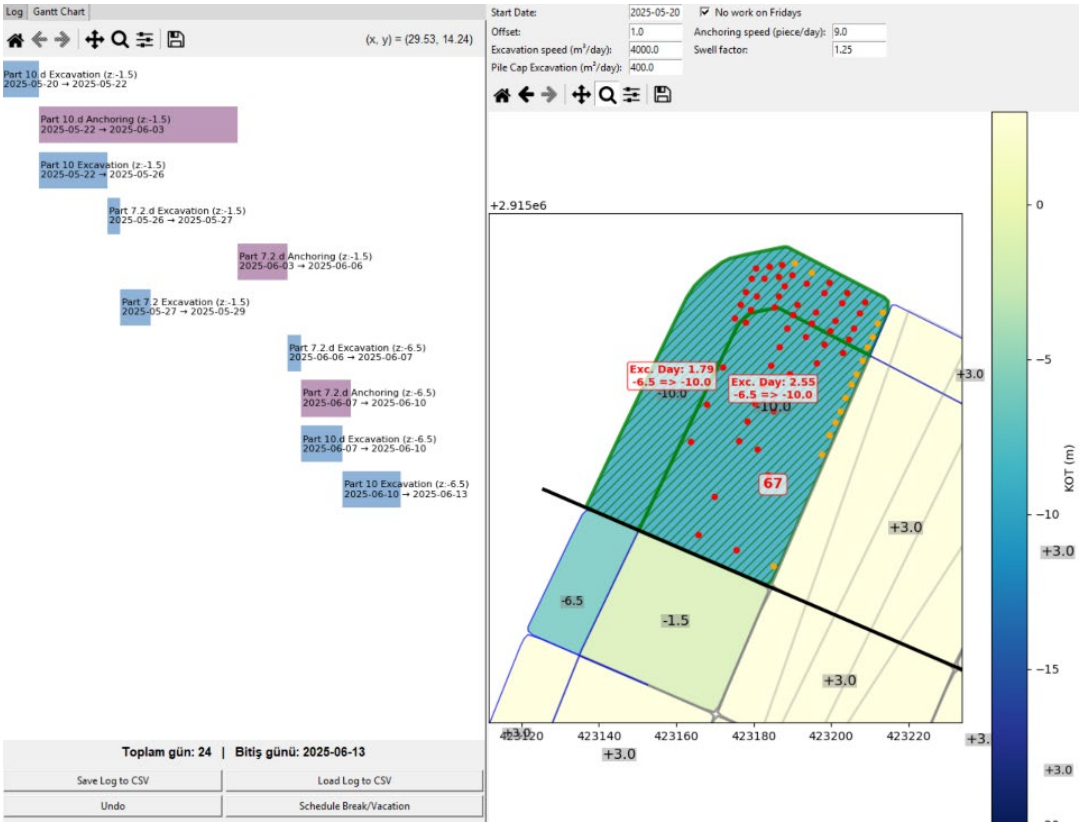
Şekil 3. ArcGIS Pro ortamında BIM modelinin coğrafi veriyle bütünleşik 3B görselleştirmesi: Kazı destek yapısının (diyafram duvar, zemin ankrajları ve kazıklar) araziyle ilişkisi detaylı olarak görülüyor.

Bu örnekte, oluşturulan BIM modeli coğrafi bağlama oturtulmak ve kazı planlamasıyla entegre şekilde incelenmek üzere ArcGIS Pro yazılımına aktarılmıştır. ArcGIS, güçlü 3B görselleştirme kabiliyetleri ve mekansal analiz araçları sayesinde, dijital ikiz modelinin saha ölçeğinde değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Şekil 3'te görüldüğü gibi, Revit'te hazırlanmış olan derin kazı destek sistemi modeli (diyafram duvarlar, ankrajlar, kazıklar), ArcGIS üzerinde arazinin topografyası ve şehir koordinat sistemine uygun olarak konumlandırılmıştır. Bu sayede, tasarım modeli gerçek dünyadaki konumunda, çevresindeki yapılar, yollar ve topografya ile birlikte incelenebilmiştir.

ArcGIS üzerinde modelin görüntülenmesi, sadece statik bir görselleştirme sağlamakla kalmamış, aynı zamanda kazı takvimi planlamasının entegrasyonuna da imkan tanımıştır. Proje takvimindeki her bir kazı aşaması ve ankraj uygulama adımı, ArcGIS platformunda zaman boyutuyla ilişkilendirilebilir durumdadır. Örneğin, kazı işlemleri tabaka tabaka veya bölge bölge planlandığında, ArcGIS'te her tabaka/bölge için bir zaman damgası atanmış ve böylece *"time slider"* aracıyla kazının ilerleyişi animasyon şeklinde görselleştirilebilmiştir. Bu, proje yöneticilerinin ve ekiplerin, planlanan takvime göre kazının hangi gününde ne kadar ilerleme olması gerektiğini, hangi aşamada hangi ankrajların aktif hale geleceğini üç boyutlu ortamda öngörmesine yardımcı olur. Ayrıca, mekansal analiz imkanları sayesinde,

her bir kazı aşamasının çevredeki yapılar veya altyapı ile mesafesi, risk bölgeleri gibi hususlar ArcGIS üzerinde değerlendirilebilmiştir.
ArcGIS tabanlı bu 3B entegrasyon, dijital ikizin *coğrafi gerçeklikle buluştuğu* noktadır. BIM modelinin detayı, GIS ortamının geniş ölçekli bağlam bilgisiyle birleşerek, proje için ortak bir operasyonel resim (common operational picture) oluşturur. Bu örnek, dijital ikizin sadece mühendislik ekibi için değil, aynı zamanda harita uzmanları, şehir plancıları veya proje paydaşları için de anlaşılır bir iletişim aracı haline geldiğini göstermektedir.

4.4. Kazı ve Ankraj Planlaması için Özel Yazılım



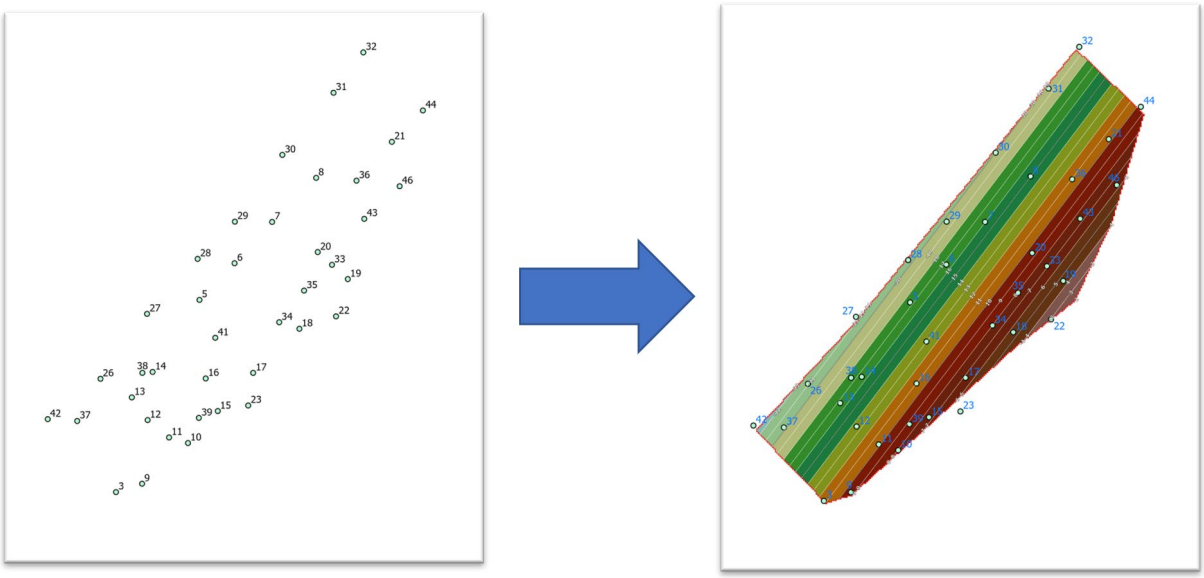
Şekil 4. Özel geliştirilen planlama yazılımından bir ekran görüntüsü: Sol tarafta kazı ve ankraj aktivitelerine ait Gantt takvimi, sağ tarafta ise kazı alanının plan görünümünde katmanlara göre ilerleme durumu ve karar destek notları yer almaktadır.

Bu uygulama örneğinde, proje ekibi tarafından geliştirilen özel bir yazılım aracı ile kazı ve ankraj planlaması dijital ikiz modeline entegre edilmiştir. Şekil 4'te görülen arayüz, bir yandan klasik bir Gantt çizelgesi formatında zaman planını gösterirken, diğer yandan coğrafi ve yapısal bilgiyi de aynı ekranda sunmaktadır. Sol panelde, kazının farklı kısımları (bölge veya kademe bazında) ve her bir kısma ait ankraj uygulamalarının gün bazında programı detaylandırılmıştır. Örneğin, "Level 1 Excavation" ve buna bağlı "Level 1 Anchors Installation" gibi aktiviteler, süreleriyle birlikte listelenmektedir. Sağ panelde ise, kazı alanının plan veya kesit görünümünde, ilgili aşamada nerede çalışıldığı görsel olarak işaretlenmiştir. Renk kodları veya semboller aracılığıyla, belirli bir günde aktif olan kazı bölgesi ve o bölgeye ait ankrajların durumu (kurulmuş, kurulacak, ön gerilmeli vb.) harita üzerinde izlenebilmektedir.

Bu özel yazılım, dijital ikiz konseptinin önemli bir boyutu olan planlama ve gerçek zamanlı durum farkındalığı hususunu desteklemektedir. Kullanıcılar, program üzerinde bir değişiklik yaptığında (örneğin beklenmeyen bir nedenle kazı süresinin uzaması), bu değişiklik anında sağ taraftaki mekansal gösterime yansımakta ve hangi bölgelerin etkileneceği görülebilmektedir. Yazılım aynı zamanda kot bazlı karar alma desteği sunmaktadır: Örneğin belirli bir kotun altına inildiğinde kazık başlığı kazısı nedeniyle hızdaki düşüşün hesaba katılması gerekiyorsa, sistem bu kuralı tanımlayarak ilgili kotta takvim sürelerini düzenleyebilmektedir. Bu tür akıllı planlama özellikleri, dijital ikizin karar destek sistemi yönünü güçlendirmektedir.

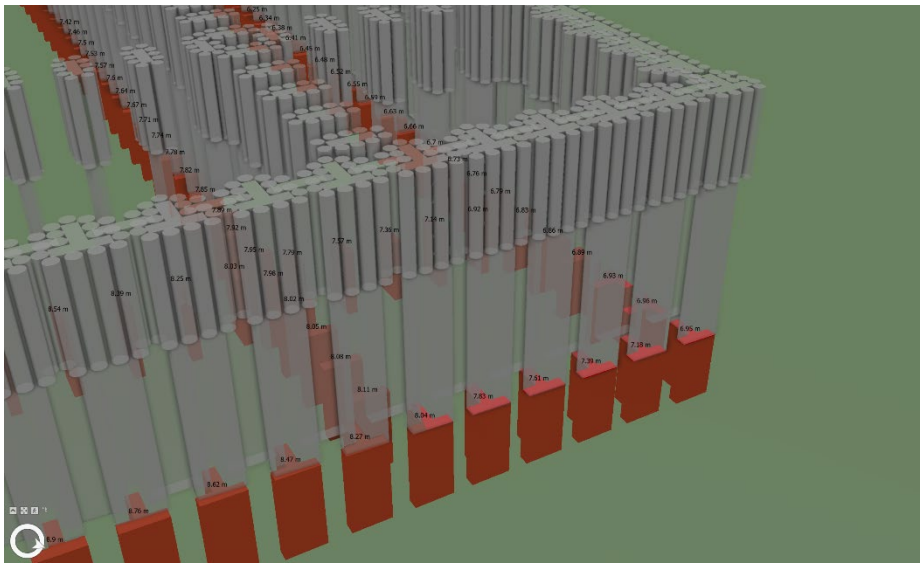
Ayrıca, yazılım bir veritabanı ile çalıştığından, şantiyeden gelen güncellemeler (gerçekleşen ilerleme, karşılaşılan zemin koşulları gibi bilgiler) doğrudan sistemde işlenebilmekte ve Gantt takvimi ile mekansal model anlık olarak güncellenebilmektedir. Bu, klasik yöntemlerle kıyaslandığında çok büyük bir avantajdır: Normalde haftalık toplantılarda güncellenen iş programı, bu dijital ikiz tabanlı sistem sayesinde günlük hatta saatlik revizyonlarla sahadaki gerçek duruma uyarlanabilmektedir. Neticede, özel geliştirilen bu yazılım aracı, dijital ikizin proje yönetimi boyutunu temsil etmekte ve inşaat süreci planlamasını saha gerçekliğiyle bütünleştirmektedir.

4.5. Zemin Modelleme: Kriging ve BIM Entegrasyonu



Şekil 5. GIS tabanlı kriging analiziyle sondaj loglarından elde edilen kaya yüzeyi modeli

Bir geoteknik dijital ikizin başarısı, yapısal model kadar zemin modelinin doğruluğuna ve detayına da bağlıdır. Bu örnekte, proje sahasındaki sondaj kuyusu verileri kullanılarak zemine ait bir katman (örneğin ana kaya yüzeyi) GIS ortamında Kriging yöntemiyle enterpole edilmiş ve elde edilen 3B zemin modeli BIM yapısal modeliyle birleştirilmiştir. Kriging, jeostatistiksel bir ara yöntem olarak düzensiz dağılmış nokta verilerden (örneğin sondaj noktalarında ölçülen kaya derinliği) sürekli bir yüzey oluşturmak için kullanılmıştır. ArcGIS Pro yazılımında uygulanan kriging analizi sonucunda, çalışma alanının tamamı için kaya temelinin yaklaşık konumunu gösteren bir 3B yüzey elde edilmiştir. Bu yüzey, Şekil 6'da kırmızı renkle temsil edilen hacimler olarak görülmektedir.



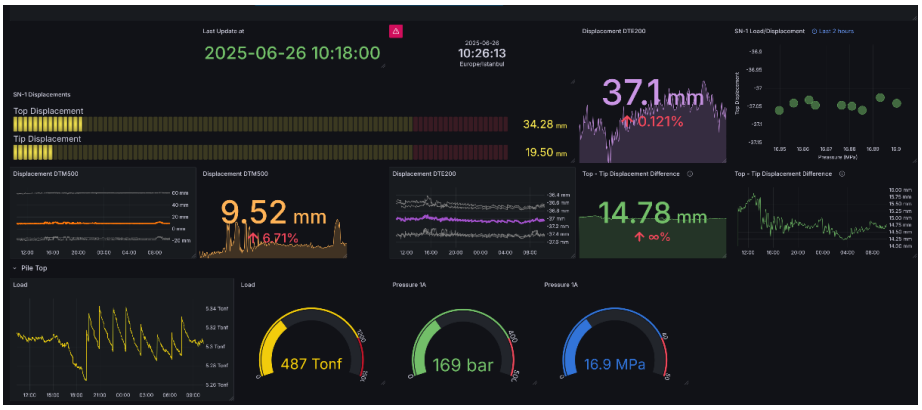
Şekil 6. GIS tabanlı kriging analiziyle elde edilen kaya yüzeyi modeli (yeşil alan) ile BIM kazık modelinin etkileşimi: Her bir kazığın kayaya gömülü kısmı 3B olarak kırmızı hacimde görselleştirilmiştir, kesişen kısmın yükseklik değeri her elemanın üzerine yazılmıştır.

Elde edilen jeolojik model, dijital ikiz platformunda BIM modeliyle entegre edildiğinde, yapısal elemanlar ile zemin arasındaki ilişkiler otomatik olarak analiz edilebilmiştir. Şekil 6, bu entegrasyon sonucunda her bir kazığın kaya içine gömülü kısmının (penetrasyon derinliğinin) görsel olarak ortaya konulduğunu göstermektedir. Sayısal olarak, her kazık için kaya yüzeyine göre gömülme derinliği hesaplanmış; bu bilgiler hem tasarım kontrollerinde kullanılmış hem de görsel bir geri bildirim olarak proje ekibine sunulmuştur. Ayrıca dijital ikiz model, zemin ve yapı etkileşimini bütüncül değerlendirmeye imkân tanıdığı için, farklı senaryoların denenmesini kolaylaştırmıştır. Örneğin, eğer bazı bölgelerde kaya derinliği değişkenlik gösteriyorsa, model üzerinde bu bölgeler hemen tespit edilmiş ve gerekirse ilave mühendislik önlemleri planlanmıştır.

Bu uygulama, GIS ile BIM arasındaki entegrasyonun mühendislik açısından somut bir faydasını yansıtmaktadır: Zemin modelinin dijital ikize dahil edilmesi, sadece yapının tasarım parametrelerini değil, aynı zamanda doğal ortamın değişkenliğini de hesaba katan bir yaklaşıma kapı açar. Bu sayede belirsizliklerin daha iyi yönetilmesi, tasarım varsayımlarının sahaya uygunluğunun sürekli sınanması mümkün olur. Geoteknik projelerde sıkça vurgulanan “beklenmedik zemin koşulları” olgusuna karşı, dijital ikiz destekli bu yöntem proaktif bir hazırlık sağlamaktadır.

4.6. Gerçek Zamanlı İzleme: Bulut Sensör Verileri ve Grafana

Dijital ikiz teknolojisinin en yenilikçi uygulamalarından biri, geoteknik izleme sensörlerinden gelen saha verilerinin gerçek zamanlı toplanıp görselleştirilmesidir. Bu kapsamda, sensör verileri bulut tabanlı bir sistemde toplanır ve Grafana gibi platformlar aracılığıyla dinamik gösterge panellerine dönüştürülür. Bu paneller sayesinde mühendisler, kazık yer değiştirmeleri veya anlık yükler gibi kritik saha ölçümlerini anlık olarak takip edebilir. Bu yaklaşım, geleneksel raporlamanın getirdiği gecikmeleri ortadan kaldırır ve önceden belirlenmiş eşik değerlere dayalı alarm sistemleriyle anormal bir durum oluştuğunda ilgili ekipleri derhal haberdar eder.



Şekil 7. Gerçek zamanlı sensör verilerinin Grafana gösterge paneli üzerinden izlenmesi.

Bu gerçek zamanlı veri akışı, dijital ikizi pasif bir izleme aracından öteye taşıyarak aktif bir karar destek mekanizmasına dönüştürür. Toplanan veriler, yalnızca mevcut durumu izlemek için değil, aynı zamanda makine öğrenmesi gibi ileri analizlerle geleceğe yönelik tahminler yapmak için de bir temel oluşturur. Sistem, kritik bir eşik aşıldığında alarm üretmenin yanı sıra, dijital ikiz modelini otomatik olarak güncelleyerek daha güvenli senaryoların analizini tetikleyebilir. Bu dinamik entegrasyon, dijital ikizi fiziksel ortamdaki değişimleri anbean yansıtan "yaşayan bir sistem" haline getirir.

5. SONUÇ

Dijital ikiz teknolojileri, geoteknik mühendisliği projelerinde dinamik ve uyarlanabilir bir tasarım ve yönetim anlayışının temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Bu bildiride sunulan kuramsal çerçeve ve uygulama örnekleri, dijital ikizlerin saha gerçekliği ile proje planlaması arasında etkili bir köprü kurarak mühendislerin daha isabetli ve zamanında kararlar almasına olanak tanıdığını göstermektedir. Geleneksel yöntemlerde sıkça karşılaşılan tasarım ile uygulama arasındaki uyumsuzluklar, dijital ikiz yaklaşımı sayesinde sürekli geri bildirim döngüsüyle yönetilebilir hale gelmekte, model ile saha verileri arasındaki etkileşim iki yönlü olarak sürdürülebilmektedir.

Gerçek zamanlı izleme ve çok boyutlu modelleme olanakları sayesinde dijital ikizler, projenin güvenliğini ve esnekliğini artırırken farklı senaryoların hızla değerlendirilebilmesini ve gerekli önlemlerin erkenden alınabilmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, ortak bir dijital model üzerinde çalışan paydaşlar arasında daha etkili iletişim kurulmakta, karar süreçlerinde şeffaflık ve hız kazandırılmaktadır. Özellikle BIM ve GIS entegrasyonunun sağladığı bütüncül bakış açısı, yapı-zemin etkileşimini kapsamlı biçimde yönetmeyi mümkün kılmaktadır.

Elbette, bu teknolojilerin uygulanmasında veri yönetimi, yazılım uyumu ve güvenlik gibi bazı zorluklar bulunsa da gelişen dijital altyapı bu engelleri aşmayı giderek kolaylaştırmaktadır. Sonuç olarak, dijital ikiz uygulamaları; daha optimize tasarımlar, daha güvenli inşaat süreçleri ve daha etkin izleme stratejileriyle geoteknik mühendisliğinde yüksek katma değer sunmakta ve sektörde yeni bir mühendislik paradigmasının öncüsü olmaktadır.

KAYNAKLAR

Grieves, M. W., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches (pp. 85–113). Springer International Publishing.

Haryono, I. S., Saw, A. L., Lee, S. W., & Wong, L. C. K. (2022). Digital Twin for Geotechnical Engineering Applications. Proceedings of The HKIE Geotechnical Division 41st Annual Seminar (GDAS2021), Hong Kong Institution of Engineers, 73–84.

Jiang, F., Ma, L., Broyd, T., & Chen, K. (2021). Digital twin and its implementations in the civil engineering sector. Automation in Construction, 130, 103838. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103838

Kenworthy, A. (2021). The role of the 3D Geological Model in Geotechnical BIM. Seequent (blog). Erişim adresi: https://www.seequent.com/the-role-of-the-3d-geological-model-in-geotechnical-bim/

Leng, J., Jiang, P., Xu, K., Liu, Q., Zhao, J. L., Bian, Y., & Shi, R. (2019). Makerchain: A blockchain with chemical signature for self-organizing process in social manufacturing. Journal of Cleaner Production, 234, 767–778. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.265

Lu, V. Q. C., Parlikad, A. K., Woodall, P., Ranasinghe, G. D., & Heaton, J. (2019). Developing a dynamic digital twin at a building level: Using Cambridge campus as case study. Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction (ICSIC 2019), 67–75. https://doi.org/10.1680/icsic.64669.067

Meschini, S., Pellegrini, L., Locatelli, M., Accardo, D., Tagliabue, L. C., Di Giuda, G. M., & Avena, M. (2022). Toward cognitive digital twins using a BIM-GIS asset management system for a diffused university. Frontiers in Built Environment, 8, 959475. https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.959475

Meschini, S., Accardo, D., Avena, M., Seghezzi, E., Tagliabue, L. C., & Di Giuda, G. M. (2022). Data integration through a BIM-GIS web platform for the management of diffused university assets. In Proceedings of the 2022 Conference of European Council for Computing in Construction (EC3) (Vol. 3, pp. 237–244). University of Turin. https://doi.org/10.35490/EC3.2022.217

Song, Y., Wang, X., Tan, Y., Wu, P., Sutrisna, M., Cheng, J. C. P., & others. (2017). Trends and opportunities of BIM–GIS integration in the AEC industry: a review from a spatio-temporal perspective. ISPRS International Journal of Geo-Information, 6(12), 397. https://doi.org/10.3390/ijgi6120397

Wang, Z., Wang, Y., Wang, X., Yang, K., & Zhao, Y. (2023). A novel Digital Twin framework for aeroengine performance diagnosis. Aerospace, 10(9), 789. https://doi.org/10.3390/aerospace10090789