

Tarihi Yapıların Sürdürülebilirliğinde Dijital İkiz Kullanımı: Bir Çoklu Durum Çalışması*

The Use of Digital Twins in the Sustainability of Historic Buildings: A Multiple Case Study

Gülşen Akgöz, *Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi*, 00009-0008-1920-2602

Gamze Ergin, *Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi*, 0000-0002-7874-4902

Özet

Tarihi yapılar, geçmişin kültürel dokusunu günümüze taşıyan, toplumların kimliğini yansıtan ve gelecek kuşaklara aktarılması gereken önemli miraslardır. Ancak bu değerli yapıların korunması, doğal afetler, çevresel koşullar, insan kaynaklı tahribat ve zamanın yıpratıcı etkisi nedeniyle zorlaşmaktadır. Bu yüzden, tarihi yapıların sürdürülebilirliğinin sağlanması için kapsamlı koruma ve restorasyon stratejilerinin hayata geçirilmesi gerekmektedir. Bu gerekliliği karşılamak amacıyla yapılan belgeleme çalışmaları, tarihi yapıların korunması için önemli bir temel oluşturur. Zaman içinde çeşitli belgeleme yöntemleri kullanılsa da teknolojinin gelişmesi daha hassas yöntemlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Günümüzde bu yöntemler arasında öne çıkan dijital ikiz teknolojisi, tarihi yapıların korunması, bakımı ve restorasyonu için kullanılmaktadır. Dijital ikiz, fiziksel bir yapının gerçek zamanlı verilerle beslenerek sanal bir kopyasının oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu teknoloji, yapıların mevcut durumunu analiz ederek gelecekteki riskleri öngörmekte, onarım süreçlerini planlar ve malzeme yıpranmasını takip etmektedir. Dijital ikizler koruma ve restorasyon süreçlerinin yanı sıra eğitim ve turizm gibi farklı alanlarda da kullanılmaktadır. Bu nedenle, dijital ikiz özellikle nitelikli tarihi yapılarda kullanıma kazandırılmıştır. Dünyanın farklı ülkelerinde bu teknolojiyle geliştirilen projelerin yaygınlaşması beklenmektedir. Bu makalede dijital ikizlerin tarihi yapıların sürdürülebilirliğine sağladığı katkı, örneklerle analiz edilerek incelenmiştir. Dijital ikiz oluşturmak amacıyla kullanılan teknolojiler; veri toplama, modelleme, analiz ve simülasyon, görselleştirme ve etkileşim teknolojileri olarak gruplandırılmıştır. Makalede, örneklem olarak seçilen Notre Dame Katedrali, Orsanmichele Kilisesi, Alhambra Sarayı ve St. Peter's Bazilikası incelenerek dijital ikizin hangi amaç ve yöntemlerle kullanıldığı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışma, dijital ikizin tarihi yapıların korunmasını sağlamanın yanı sıra, bu yapıların sürdürülebilirliğe nasıl katkı sağladığını ve gelecekte bu teknolojilerin restorasyon ve koruma alanında kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: Dijital ikiz, kültür varlıkları, koruma ve onarım, sürdürülebilirlik, kültürel miras.

Akademik Disiplin(ler)/Alan(lar): Mimarlık, iç mimarlık, koruma ve restorasyon.

Abstract

Historical buildings serve as important sites of heritage that carry the cultural essence of the past into the present, reflect the identity of societies, and should be passed on to future generations. However, the preservation of these valuable structures is becoming increasingly difficult due to natural disasters, environmental conditions, human-induced destruction, and the corrosion over time. Therefore, comprehensive conservation and restoration strategies must be implemented to ensure the sustainability of historic buildings. The documentation methods employed to meet this requirement form a crucial foundation for the conservation of these structures. Advancements in technology have led to the development of more sensitive techniques. Today, digital twin technology stands out among these methods, proving invaluable for the preservation, maintenance, and restoration of historic buildings. Digital twins allow for the creation of a virtual replica of a physical structure by integrating real-time data. This technology analyzes the current state of structures, predicts future risks, plans repair processes, and monitors material wear and tear. In addition to conservation and restoration processes, digital twins are also applied in various fields such as education and tourism. Consequently, this technology is especially used in notable historical buildings. It is anticipated that projects developed using digital twin technology will become widespread in different countries around the world. This article analyzes and examines how digital twins contribute to the sustainability of historical buildings through relevant examples. The technologies involved in creating digital twins are categorized into data collection, modeling, analysis and simulation, visualization, and interaction technologies. Using Notre Dame Cathedral, Orsanmichele Church, Alhambra Palace, and St. Peter's Basilica as case studies, the article examines the purposes and applications of digital twins, revealing how they enhance the preservation and sustainability of historic buildings. Furthermore, it discusses how these technologies can be utilized in the fields of restoration and conservation in the future.

Keywords: Digital twin, cultural assets, conservation and restoration, sustainability, cultural heritage.

Academical Disciplines/Fields: Architecture, interior architecture, conservation and restoration.

*Bu çalışma Gülşen Akgöz'ün Dr. Öğr. Üyesi Gamze Ergin danışmanlığında Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İç Mimarlık Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı'nda devam eden tez çalışmasından üretilmiştir.

- **Sorumlu Yazar:** Gülşen Akgöz.
- **Adres:** İstanbul
- **E-posta:** 20232102004@ogr.msgsu.edu.tr
- **Çevrimiçi yayın tarihi:** 19.06.2025
- **doi:** 10.17484/yedi.1648438

Geliş tarihi: 21.05.2025 / Kabul tarihi: 25.06.2025

1. Giriş

Tarihi yapılar geçmişi günümüze taşıyan, kültürel izler barındıran ve gelecek nesillere aktarılması gereken değerli miraslardır. Bu kültürel miras öğelerinin geleceğe aktarımı, doğal afetler, çevresel faktörler, vandalizm ve zamanla oluşan bozulmalar gibi nedenlerle zorlaşmaktadır. Bu nedenle tarihi yapıların sürdürülebilirliğinin sağlanmasında alınacak önlemler oldukça önemlidir. Sürdürülebilirlik yapıların hem fiziksel hem işlevsel fonksiyonlarını devam ettirebilmesini sağlamaktadır. Bu bağlamda yapıya ait tüm özelliklerin belgelenmesi ve koruma amaçlı stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Doğru ve eksiksiz bir belgeleme çalışması ile yapının teknik ve fiziksel özellikleri, malzeme yapısı, işlevi ve yapıda bulunan sanat eserlerinin yanı sıra, yapısal sorunları da kayıt altına alınabilmektedir. Bu nedenle yapıyı korumak ve gelecek nesillere aktarabilmek için uygun belgeleme yöntemleri tercih edilmelidir. Tarihi yapıların sürdürülebilirliğinin sağlanması için çeşitli koruma stratejileri geliştirilmiştir. Dijitalleşme ile birlikte bu stratejilerin çeşitliliği artmıştır. Dijital belgeleme yöntemleri, koruma ve sürdürülebilirlik açısından önemli ilerlemeler sağlamıştır. Geleneksel belgeleme yöntemlerinden olan çizim, fotoğraflama gibi yöntemlere ek olarak güncel teknolojiler sayesinde daha hızlı, hassas ve detaylı kayıt alabilen yöntemler geliştirilmiştir.

Nitelikli yapılar incelendiğinde yaygın birtakım yöntemlerle yapılardan veri toplanıp, toplanan verilerin işlenerek üç boyutlu modellerin, iki boyutlu teknik çizimlerin ve belgeleme için gerekli malzeme bilgisi gibi önemli detayların arşivlendiği gözlemlenmiştir. Dijitalleşme beraberinde dijital ikiz kavramını da ortaya çıkarmıştır. Dijital ikizler ile tarihi yapıların gelecek durumu ile ilgili ön değerlendirme yapılabildiğinden belgeleme ve koruma yöntemleri bağlamında güncel bir çözüm haline gelmiştir. Belgelenmesi yapılacak yapının teknik özellikleri, niteliği, çalışmanın amacı gibi faktörler kullanılacak veri toplama ve işleme yönteminin seçilmesinde etkilidir. Dijital ikiz teknolojisi günümüzde birçok farklı sektörde kullanılmaktadır. Bu sektörlere havacılık ve uzay, üretim ve endüstri, inşaat ve mimarlık sektörleri örnek verilebilir. Her sektörde birbirinden farklı amaca hizmet etse de kullanım prensibi temelde aynıdır. Bu prensip, fiziksel bir nesnenin dijital bir temsilini oluşturmaya dayanır. Fiziksel nesne ve dijital temsil arasında tam zamanlı bilgi akışı bulunmaktadır. Bu şekilde ileri dönük veri analizi yapılabilmektedir. Bir dijital ikiz aracılığıyla parça, ürün, süreç veya üretim hattı incelenebilmekte, derinlemesine analiz yapılabilmekte ve bir prototip görevi gördüğü için potansiyel sorunlar tespit edilip çözüm sağlanabilmektedir. Söz konusu tarihi yapılar olduğunda ise, bu teknoloji kültür varlıklarını koruma kapsamında değerlendirilebileceği için kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu makalede, dijital ikizin tarihi yapıların sürdürülebilirliğine sağladığı katkıyı araştırmak, örnekler üzerinden uygulama amaç ve yöntemlerinin karşılaştırmalı analizini sunmak hedeflenmiştir.

2. Yöntem ve Metodoloji

Araştırmada nitel araştırma yöntemlerinden bütüncül çoklu durum deseni kullanılmıştır. Nitel araştırma yöntemine uygun olarak niçin, nasıl, ne şekilde gibi sorulara cevap aranmıştır. *Dijital ikiz teknolojisi tarihi yapıların sürdürülebilirliğini nasıl destekler? Enerji verimliliği ve yapı sağlığı izleme süreçlerinde hangi dijital araçlar kullanılmaktadır? Dijital ikiz kullanımının avantajları ve dezavantajları nelerdir?* soruları başlıca araştırma soruları olarak belirlenmiştir. Bu amaçla araştırma iki aşamalı olarak kurgulanmıştır. İlk aşamada, tarihi yapıların sürdürülebilirliğinin sağlanmasında dijital ikizlerin kullanımını aktarmak amacıyla, dijital ikiz kavramı ve dijital ikizlerin tarihi yapılarda kullanımı literatür taraması yapılarak aktarılmıştır. Elde edilen veriler, teknolojik yöntemler ve kullanım amaçlarına göre gruplandırılmıştır. İkinci aşamada ise bütüncül çoklu durum deseni (*multiple case-holistic design*) kullanılarak dünyadan seçili başlıca örnekler incelenerek tarihi yapıların dijital ikiz üretim süreçleri analiz edilmiştir. Bütüncül çoklu durum desenlerinde birden fazla durumun olduğu bir konuyu derinlemesine araştırmak amacıyla her durumun kendi içinde bütüncül olarak ele alındığı araştırmalardır (Yin, 1984 aktaran Subaşı ve Okumuş, 2017). Bu bağlamda bütüncül çoklu durum desenine uygun olarak araştırmada incelenmek üzere başlıca örnekler tespit edilmiştir.

Korunmaya değer dünya mirası niteliği taşıyan ve dijital ikizi üretilmiş tarihi yapı örnekleri olarak Fransa Paris'ten Notre Dame Katedrali, İtalya Floransa'dan *Florence As It Was* projesi kapsamında Orsanmichele Kilisesi, İspanya'dan Alhambra Sarayı ve yine İtalya Roma'dan St. Peter's Bazilikası incelenmek üzere seçilmiştir. Örneklem birimi olarak seçilen yapılar güdümlü (amaçlı) örnekleme yöntemine uygun olarak, araştırma amacı doğrultusunda belirlenmiş ve dijital ikizi etkili sonuç vermiş tarihi yapılar ve projeler incelenmek üzere seçilmiştir. Araştırma sonunda gelecekteki potansiyelden ve güncel kısıtlamalardan söz edilerek, yapılacak çalışmalar için zemin oluşturulmuştur.

3. Tarihi Yapılarda Dijital İkiz Teknolojisinin Kullanımı

NASA'nın eşleme teknolojisinin ortaya çıkardığı dijital ikiz kavramı, ilk kez 2002'de Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi kitabının yazarı Dr. Michael Grieves tarafından tanımlanmıştır. Grieves (2006) kitabında bu kavramı, fiziksel bir sistemin içinde bir dijital simülasyon modeli oluşturularak, bu modelden elde edilen verilerin gerçek sistemdeki bilgilerle ilişkilendirilmesi olarak tanımlamaktadır. Dijital ikiz, gerçek dünyadaki karşılığına benzeyen somut bir varlığın dinamik bir sanal kopyasıdır. Güncel anlamda dijital ikiz teknolojisi, bilginin birtakım sensörler kullanılarak elde edildiği, işlendiği ve bazı web veya mobil uygulamalar kullanılarak sunulan bir siber-fiziksel sistemdir (Litavniece vd., 2023).

Fiziksel bir varlığın dijital ortamda birebir temsili olarak da tanımlanabilen dijital ikiz; tarihi yapıları korumak, restore etmek ve yönetmek amacıyla kullanılmaktadır. Kültürel mirasın gelecek nesillere aktarılabilmesi için tarihi eserlerin belgeleme süreçlerinin titizlikle oluşturulması gerekmektedir. Ayrıca, restorasyon sürecinde yürütülen koruma çalışmaları kapsamında kültürel mirasın etkili bir şekilde korunması esastır. Teknolojinin gelişimine paralel olarak belgeleme yöntemleri zaman içinde önemli ilerlemeler kaydetmiş ve hızla gelişmiştir (Kaya ve Yiğit, 2020). Tarihi yapılarda dijital ikiz uygulamaları incelendiğinde nitelikli yapılarda kullanımın yaygınlaştığı görülmektedir. Buna karşın maliyetin yüksek olması nedeniyle henüz kültürel miras olarak nitelendirilen tüm yapılarda kullanıma kazandırılmamıştır. Veri toplama ve işleme teknolojilerinde çeşitlilik çoğaldıkça beraberinde proje için maliyet hesabı yapp uygun olanı seçme imkânı da artmıştır. Dikkat edilmesi gereken nokta projenin teknik özellikleridir. Her proje için aynı veri toplama ve işleme yöntemini kullanmak söz konusu değildir. Belirlenen tek bir teknolojinin kullanıldığı projeler olduğu gibi, karma yöntemler ile de çalışma yapılmaktadır. Özellikle mimari çalışmalarda, karmaşık detayların, birbirinden farklı malzemelerin, desen ve doku çeşitliğinin fazla olduğu yapılarda karma yöntemlerle de çalışma yapılmaktadır. Daha fazla verinin toplanıp işlenmesi ve bilgiye dönüştürülebilmesiyle elde edilen ikizin niteliği artmaktadır. Verimli bir dijital ikizin işleyişinde, veri toplama, veri analizi, verinin bilgiye dönüştürülmesi ve bilginin iletilmesi odaklı aşamalar bulunmaktadır. Verilerin kesintisiz olarak toplanması, işlenmesi ve anlamlı bilgilere dönüştürülmesi gerekmektedir (Ceylan, 2019). Dijital ikizin gerçek zamanlı güncelleme sağlaması, ek verilerin entegrasyonu ile mümkün olmaktadır. Farklı veri kaynaklarının entegrasyonunun fazlalığı, herhangi bir değişiklik durumunda verinin güncellenmesini kolaylaştırmaktadır. Diğer bir deyişle, dijital ikiz, veri entegrasyonu miktarı arttıkça ek veri kaynaklarına daha fazla bağımlı hale gelmekte ve dijital ikizde kullanımına ilişkin çıkarımlar, entegrasyon miktarı ile ilgili olmaktadır. Yanı sıra, dijital ikize ait kayıtlardan elde edilen verilerin birbirini destekler nitelikte olması da gerekmektedir (Yiğit ve Uysal, 2023).

Bir dijital ikiz aracılığıyla yapının mevcut durumunda hasar tespiti yapılabilmektedir (Wang vd., 2023). Yapıda bulunan çatlaklar, bozulmalar, malzeme kayıpları gibi sorunlar saptanabilmektedir. Bu durum restorasyon sürecinin önceden planlanabilmesi açısından oldukça kıymetlidir. Yapı ile ilgili deprem dayanıklılığı ve malzeme dayanıklılığı analizlerinin yapılabilmesi de dijital ikizlerin tarihi yapılarda kullanılmasının avantajlarından. Eğitim, turizm gibi alanlarda kullanılabilir materyal sunması dijital ikiz kullanımının olumlu sonuçlarındandır. Yapıların sürdürülebilirliğinde tüm bu kazanımlara ek olarak, oluşturulan dijital ikizin aynı zamanda arşivlenecek bir belge niteliği taşıması da tarihi yapıların sürdürülebilirliğinde dijital ikizlerin rolünü vurgulamaktadır. Tarihi bir yapının dijital ikizinin oluşturulması konusundaki dezavantajlar incelendiğinde yüksek maliyetli gelişmiş ekipmana ihtiyaç duyulması, elde edilen verileri işleme sürecindeki karmaşık teknolojik sistemler gibi durumlarla karşılaşmaktadır. Veri elde etme sürecinin maliyetli olmasının yanı sıra, kültürel miras niteliği taşıyan tarihi yapılarda çalışma yapmak için izlenmesi gereken prosedürler bulunmaktadır. Yasal izinlerin alınması, ekipmanı bütçeye uygun maliyetle toparlamak ve elde edilen veriyi sentezleyerek işlemek zaman ve maliyet açısından dezavantajlı olabilmektedir. Ancak sonuç ürüne bakıldığında bu dezavantajların uzun vadede avantaja dönüştüğü göz önünde bulundurulmalıdır.

Dijital ikizin maliyeti ve geliştirilmesi için ihtiyaç duyulan teknoloji çeşitliliğine göre değişmektedir. Dijital ikizin geliştirilmesinde gereken bilgi düzeyi de maliyeti etkileyebilir. Bu nedenle dijital ikiz yeniden kullanmak amacıyla tasarlamak, maliyette önemli bir düşüş sağlayabilir. Dijital ikiz, ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da yapı yaşam döngüsü boyunca önemli bir yatırım getirisi sağlamaktadır (Madni vd., 2019, Opoku vd., 2021 aktaran Bedur ve Erbaş, 2024). Dijital ikizin başarılı sonuç vermesinin ilk adımı doğru veri aktarımının sağlanması, ikinci adımı fiziksel yapıda meydana gelen değişimlere göre dijital ikizin farklı sürümlerinin tanımlanması ve yönetilmesi, üçüncü adımı ise, yapı ile ilgili anlık karar alabilmek için veri aktarımının zamanında yapılabilmesi ve bu nedenle de kesintisiz bir gerçek zamanlı bağlantı sağlanabilmesidir. Veri aktarımındaki gecikmeler sebebiyle karar verme aşamalarında yaşanacak olan gecikme, maliyeti etkileyecek unsurlardandır (Bedur ve Erbaş, 2024).

4. Veri Toplama ve İşleme Süreçleri

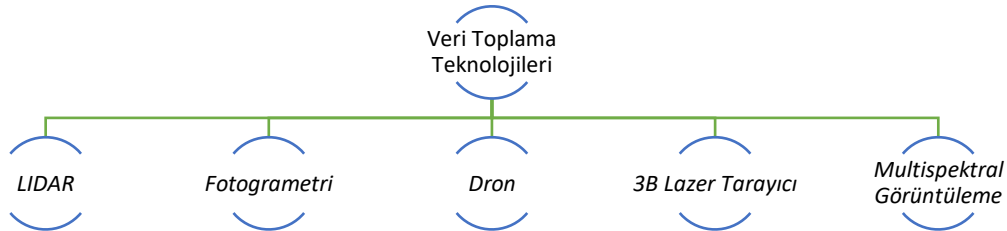
Tarihi yapıların dijital ikizi oluşturulmak istendiğinde kullanılacak teknolojiler çeşitlilik göstermektedir. Dijital ikiz oluşturma amacı, bütçe ve yapının özellikleri burada belirleyici rol oynayacaktır. Kullanılan teknolojiler veri toplama, analiz, modelleme, görselleştirme gibi farklı gruplarda incelenebilir. Bu başlık altında yaygın olarak kullanılan teknolojilerden bahsedilecektir. Zaman içerisinde teknolojik gelişmelerle beraber kullanılan yöntemler çeşitlilik gösterebilir. Dijital ikizler, bir projenin tüm yaşam döngüsü boyunca erişilebilen ve varlıkların mevcut, geçmiş ve hatta gelecekteki durumlarını temsil etmek için kullanılabilen tek bir görünüm sağlayabilmektedir. İyi bir dijital ikiz oluşturmak için temel dört koşul bulunmaktadır:

Dijital ikiz, gerçek dünyadaki varlığın tam ve eksiksiz dijital temsili olmalıdır. Dijital ikiz, öngöründe bulunmak ve fiziksel varlığı değerlendirebilmek için kullanılabilir olmalıdır. Tam ve eksiksiz veriye sahip dijital ikiz süreci beslemek için çeşitli veri kümeleri sağlanabilmelidir. Dijital ikiz ekosistemindeki anlayışı derinleştirmek için, artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR) gibi sürükleyici araçlarla desteklenmelidir. (ISO/DIS 23247-1, 2020)

4.1. Veri toplama teknolojileri

Tarihi yapıların dijital ikizi oluşturulmak istendiğinde uygulama kısmının ilk aşaması veri toplama aşamasıdır. Bu aşamada tarihi yapının fiziksel özellikleri, çevresel özellikleri, altyapısı hakkında bilgi toplanmaktadır. Bu veriler dijital ikizin temelini oluşturmaktadır (Kongs ve Huck, 2023). Veri toplama teknolojileri çeşitlilik göstermektedir. Her yapı için farklı teknolojiler tercih edilebilir. Güncel olarak sektöre kullanımı yaygınlaşmış başlıca yöntemler LIDAR ve fotogrametri'dir. Bunlara ek olarak dron, üç boyutlu (3b) lazer tarayıcı teknolojileri de kullanılmaktadır. Bu bölümde kullanımı yaygın veri toplama yöntemleri tanıtılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Dijital ikiz veri toplama teknolojileri



LIDAR (Light Detection and Ranging), lazer teknolojisini kullanarak belirli bir mesafeyi ölçen bir veri toplama yöntemidir. Lazer darbeleri göndererek bu darbelerin yüzeyden geri dönme süresini ölçmektedir. Elde ettiği ölçülerle alanın üç boyutlu haritasını oluşturmaktadır. Ölçümleri dronlar ile havadan veya karadan yapılabilir. Sürekli dönen bir sensörle çalıştığı için 360° tarama yapılabilir. Hareketli veri toplama kapasitesi genellikle şehir modellemelerinde, geniş arazilerde veya büyük ölçekli yapılarda kullanılmasını sağlamaktadır. Tarihi yapılarda bu teknoloji kullanıldığında, detaylı yüzey taramaları yaparak yapının geometrik verilerini hassas bir şekilde topladığı gözlemlenmektedir (Polat ve Uysal, 2016). Avantajları arasında hassasiyet ve hızlı veri toplama yer alırken, yüksek maliyet dezavantaj olarak belirtilebilir. Ayrıca fazla işleme gerektirmesi ve destekleyici bazı harita yazılımları ile birlikte kullanılması bu teknolojinin dezavantajlarındandır. Büyük alanları kısa sürede tarayabilmesi, bitki gibi çeşitli engellerin arkasında kalan kısımlardan da detaylı ölçü alabilmesi tercih edilme nedenlerindendir (Oruç ve Baş, 2021).

Fotogrametri, yapıya ait farklı açılardan çekilmiş fotoğrafların analiz edilerek yapının üç boyutlu bir modelinin oluşturulmasını sağlayan bir veri toplama yöntemidir (Duran ve Toz, 2003). Dronlar, yüksek çözünürlüklü kameralar aracılığıyla fotoğraf çekilmektedir. Yüksek kalitede fotoğraflar çekilmesi ve fotoğraf açıların çeşitlilik göstermesi oluşacak modelin benzerlik oranını artırmaktadır. Yüksek çözünürlüklü fotoğraf çeken birçok cihazla bu işlem yapılabilir (Ulvi ve Yiğit, 2019). Günümüzde telefonlardan elde edilen performans bile bazı projelerin belirli bölümleri için yeterli olabilmektedir (Yiğit ve Uysal, 2021). Örneğin çok detayı olmayan bir objenin çeşitli açılardan fotoğrafları alınarak fotogrametri yöntemi ile modeli oluşturulabilmektedir. Düşük maliyetli bir alternatif olmasına rağmen, LIDAR kadar hassas veriler sunmadığı için fazla detay içeren projelerde kullanımı tercih edilmemektedir veya yalnız

başına yeterli olmayacağı için başka veri toplama yöntemleri ile desteklenmektedir. Yüzey detayları ile ilgili verilerin toplanması ve yapının mevcut durumunun belgelenmesi için idealdir.

İnsansız hava aracı (drone) teknolojisi, havadan veri toplama sağlayan bir veri toplama yöntemidir. Havadan görüntü toplayarak geniş alanlarda tarama yapmaktadır. Bu şekilde veri toplama yeteneği, dron teknolojisinin özellikle çatı ve çevre analizi için kullanılmasına neden olmaktadır (Halaç vd., 2023). Zorlu arazilerde tarihi yapıları detaylı bir şekilde haritalamak için kullanılmaktadır. Bu durum dijital ikiz oluştururken özellikle yapının dış cephesinde başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Kullanımının kolay ve hızlı olması tercih edilen veri toplama yöntemlerinden biri olmasında etkili olmuştur.

3B lazer tarayıcılar, lazer ışınları kullanarak ölçüm yapılan mekânın nokta bulutu verilerini oluşturmaktadır. Tarihi yapıların detaylı ölçümlerini toplamak ve üç boyutlu bir model oluşturmak amacıyla yaygın olarak kullanılan veri toplama teknolojilerinden biridir. Bu teknoloji, hassas tarama ve çok sayıda veri noktaları sunmaktadır (Karasaka ve Beg, 2021). Bu nedenle özellikle iç mekânda karmaşık detaylara sahip ve hassas ölçüm gerektiren projelerde kullanılmaktadır. Buna ek olarak diğer veri toplama teknolojilerinin tercihe dildiği projelerde ise yine hassas ölçüm yapmak amacıyla destekleyici, tamamlayıcı yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. LIDAR teknolojisine göre daha küçük ölçekli projelerde etkili olsa da detaylı hassas ölçüm yapması ve daha düşük olması nedeniyle kullanılmaktadır.

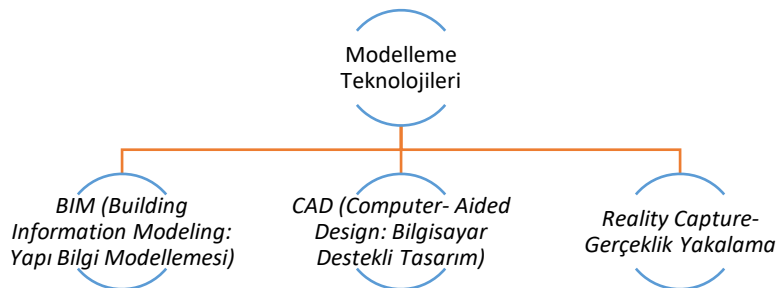
Lazer tarama teknolojileri kullanılarak istenilen nesnenin, yapının veya bölgenin 3 boyutlu nokta bulutu verisini oluşturmak mümkündür. Tarama sonrası belirli işlemlerden geçerek nokta bulutu haline getirilen bu veriden ilgili yerlerden kesit alarak oluşturulan ortofotolar aracılığı ile mimari rölöve projelerinde altlık olarak kullanılarak birebir ölçekte 2 boyutlu CAD çizimleri yapılabilir (Karasaka ve Beg, 2021). Nokta bulutu verisi 3 boyutlu modelleme programlarına çağırılarak üzerinden birebir katı model oluşturularak ilgili alanlarda kullanılmak üzere 3 boyutlu model haline getirilebilir (Erbaş, 2022).

Multispektral görüntüleme, insan gözünün algılayamadığı dalga boylarındaki ışıkları (ultraviyole, kızılötesi vb.) kullanarak yüzeyin altındaki detayları ortaya çıkarmaya yarayan bir veri toplama teknolojisidir. Bu yöntem, sanat eserleri, freskler, duvar resimleri ve tarihi yapıların yüzey altı analizlerinde kullanılmaktadır. Bu teknoloji ile malzeme bileşimi, pigment türleri, yaşlanma etkileri, geçmiş restorasyon müdahaleleri tespit edilebilmektedir (Bilici vd., 2021). Bu nedenle restorasyon projelerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

4.2 Modelleme teknolojileri

Bir dijital ikiz oluşturulurken veri toplama aşamasından sonraki ve elde edilen verilerin işlendiği adımdır ve bir model oluşturulmaktadır (Erbaş, 2022). Model oluşturmak için geliştirilmiş çeşitli yazılımlar mevcuttur. Her aşamada olduğu gibi bu aşamada da uygun yöntemin seçilmesinde birden fazla parametre bulunmaktadır. Yapısal özellikler, dijital ikiz oluşturma amacı, maliyet gibi faktörlerin yanı sıra bu aşamada ek olarak elde edilen verilerin teknik özellikleri önemlidir. Elde edilen verileri entegre etmenin en uygun olduğu yazılım tercih edilebilir. Burada projeyi oluşturan ekibin de uzmanlık alanı göz önünde bulundurulmalıdır. Sonuçta oluşturulan model yapının görselleştirilmesinde ve analiz kısmında kullanılmaktadır. Bu bölümde kullanımı yaygın modelleme teknolojileri tanıtılacaktır (Tablo 2).

Tablo 2. Dijital ikiz veri modelleme teknolojileri



BIM (Building Information Modelling), fiziksel bir binanın tasarımdan daralmaya kadar tüm yaşam döngüsü boyunca ve işletme ve bakım aşaması boyunca dijital bir temsildir (Borrmann vd., 2018 aktaran Hocaoglu 2022). Yapıya ait bilgileri dijitalle aktaran bir sistemdir. Geometrik özellikler, malzeme bilgisi, süreç planlaması gibi önemli birtakım verileri içermektedir. Bu nedenle dijital ikiz oluşturulurken tercih edilen yaygın yazılımlardan biridir.

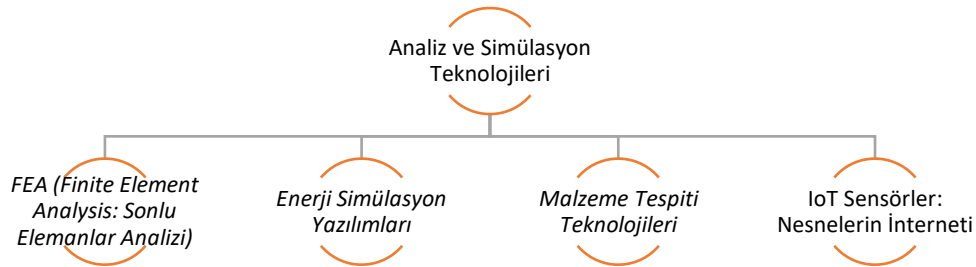
CAD (Computer-Aided Design), yapıların iki ve üç boyutlu çizimlerini yapmak için kullanılan yazılımlardan biridir. Esnek çizim araçları içermesi nedeniyle mimarlar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. Yüksek hassasiyetli, detaylı çizimler için kullanıma uygundur (Turgay ve Akar, 2023). Dijital ikiz projelerinde tarihi yapıların detaylı, teknik çizimlerini oluşturmak için tercih edilebilir.

Fotogerçekçi (Reality Capture) üç boyutlu modeller oluşturmak için kullanılan modelleme teknolojilerindendir. LIDAR, fotogrametri gibi yöntemlerle elde edilen verileri işleyerek bir model oluşturma yeteneğine sahiptir. Karmaşık verileri birleştirebiliyor olması diğer modelleme yöntemlerinden ayrılmasını ve tercih edilmesini sağlamaktadır (Alizadehsalehi ve Yitmen, 2023). Tarihi yapıların görsel olarak belgelenmesi için sıklıkla kullanılan yazılımlardandır.

4.3. Analiz ve simülasyon teknolojileri

Analiz ve simülasyon dijital ikiz oluşturma sürecinin son bir önceki adımıdır. Bu aşama tamamlanabilen veya tek seferlik bir aşama değildir. Somut yapı ve dijital ikiz arasındaki döngüyü sağlayan, yapı ile birlikte yaşayan bir süreçtir. Bu aşamada çeşitli sensörlerle analizler ve simülasyonlar yapılmaktadır. Dijital ikiz oluşturma amacına göre burada kullanılacak yazılımlar farklılık gösterebilir (Tablo 3).

Tablo 3. Dijital ikiz analiz ve simülasyon teknolojileri



FEA (Finite Element Analysis) teknolojisi, yapının mekanik stres ve yük dağılımını tespit eden bir mühendislik teknolojisidir. Muhtemel zayıf noktaları ve yapı dayanıklılığını tespit etmektedir (Cardacı vd., 2011). Bu nedenle dijital ikiz teknolojilerinde tercih edilmektedir. Yapıdaki muhtemel hasarı önlemek için önceden analiz sunması yapı için hayati önem taşımaktadır.

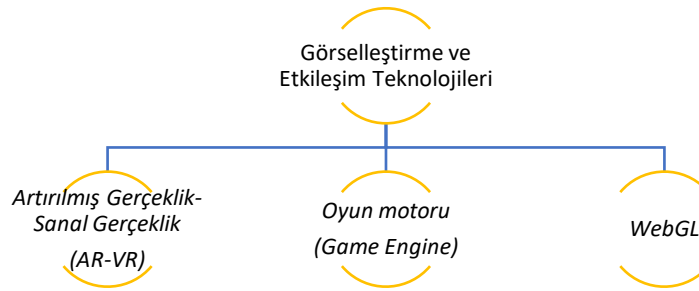
Enerji simülasyon yazılımları yapının ısı kayıplarını ve enerji performansını analiz etmektedir. Yapılan bu analizler enerji verimliliği sağlama, sürdürülebilirlik gibi hassas noktalarda yapı için önemli adımlar atılmasını sağlamaktadır (Dilber ve Özdemir, 2022).

Malzeme tespiti teknolojileri, yapıya ait malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliğini tespit edebilen teknolojilerdir. Yapı malzemelerinin ömrü ve dayanıklılığı hakkında bilgi verebiliyor olması nedeniyle restorasyon için uygun malzemelerin seçimini sağlamaktadır. Bu bakımdan dijital ikizlerin analiz ve simülasyon aşamalarında tercih edilmektedirler.

Nesnelerin İnterneti (IoT), veri alışverişi yapmak ve internet üzerinden diğer sistem ve cihazlarla bağlantı kurmak amacıyla sensörler, işleme yeteneği, yazılım ve diğer teknolojilerle uyumlanmış fiziksel nesnelerin ağını tanımlamaktadır (Bıçakçı, 2019). Bulut platformlarının kullanılabilirliğindeki artış ve düşük maliyetli sensör teknolojisi nedeniyle IoT'nin kullanımı artmıştır (Hocaoğlu, 2022). Yapıya yerleştirilerek kullanılan IoT sensörler yapının nem, sıcaklık, titreşim, ısı gibi değerlerini analiz ederek sunmaktadır. Verileri anlık olarak sunması bu teknolojiyi en çok tercih edilen yöntemlerden biri yapmaktadır. Dış etkileri sürekli ölçmesi ve uzun vadede izleme sağlaması altyapı problemlerinin çözümü, restorasyon projelerinden verimli sonuç alınması gibi önemli noktalarda başarı sağlamaktadır.

4.4. Görselleştirme ve etkileşim teknolojileri

Görselleştirme ve etkileşim teknolojileri dijital ikiz projelerinin son aşamasıdır. Bu aşama dijital ikizin kullanıcıya sunulması, etkileşimli hale getirilmesi adımlarını kapsamaktadır. Oluşturulan her dijital ikizin halka açık olmadığı konusuna vurgu yapmak gerekir. Bu durum birtakım turizm politikalarından veya dijital ikizin oluşturulma amacına bağlı olabilmektedir. Sadece altyapı sorunlarını gidermek için oluşturulmuş bir dijital ikiz görselleştirme ve etkileşim teknolojileri ile desteklenip halka sunulmayabilir. Bu kısımda kullanımı yaygın bazı görselleştirme ve etkileşim teknolojileri tanıtılacaktır (Tablo 4).

Tablo 4. Görselleştirme ve etkileşim teknolojileri

Artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR), yapıyı sanal bir ortamda keşfetmeyi sağlayan teknolojilerdir. Etkileşimli bir deneyim sağladığı için gerçekçiliği yüksektir. Sanal turlar ile turizm ve eğitim amaçlı kullanılabilmenin yansısı, restorasyon çalışmalarında da kullanılabilmektedir. AR teknolojisi, çevrede algılanan fiziksel unsurlara ait görsel, işitsel ve dokunsal bilgileri bilgisayar ortamında oluşturulan 3B modellerle zenginleştirilerek farklı bir gerçeklik algısı sunan etkileşimli bir deneyim türüdür (Uslu ve Uysal, 2020). Bu yöntemle, herhangi bir nesne yeniden oluşturulabilir ve artırılmış gerçeklik uygulamalarında sanal içerik olarak kullanılabilir (Boboc vd., 2019 aktaran Uysal ve Yiğit, 2021).

Oyun motoru (Game Engine), oyun dünyasının teknik altyapısını sağlayan bir sistemdir ve doğrudan oyunun kurallarını belirlememektedir. Bunun yerine, kullanıcı girişlerini algılayan, grafik ve ses gibi çıkış işlemlerini yöneten, fizik kurallarını ve nesnelerin hareketlerini kontrol eden modüllerden oluşmaktadır (Lewis ve Jacobson, 2002). Sektörde yaygın olarak karşımıza en çok çıkan iki program Unity ve Unreal Engine gibi oyun motorlarıdır. Bu oyun motorları aracılığıyla görsel açıdan zengin modeller oluşturulmaktadır. Gerçek zamanlı görselleştirme imkânı sunmaktadır.

WebGL, internet tarayıcılarının bilgisayardaki Grafik İşleme Birimlerine (GPU) erişmesini sağlayan bir standarttır. Başlangıçta OpenGL ES 2.0 temel alınarak geliştirilmiş, ancak daha sonra farklı işletim sistemleri ve cihazlarda çalışabilmesi için bağımsız hale gelmiştir. WebGL, web tabanlı gerçek zamanlı 3B grafik işleme imkânı sunarak video oyunları, bilimsel görselleştirme, tıbbi görüntüleme gibi birçok alanda yeni olanaklar yaratmıştır. Web tarayıcılarının yaygınlığı sayesinde, bu tür 3B uygulamalar sadece bilgisayarlarda değil, akıllı telefonlar ve tabletler gibi mobil cihazlarda da kullanılabilir hale gelmiştir (Cantor ve Jones, 2012). 3B modellerin internet üzerinden herhangi bir platforma bağı kalmadan incelenebilmesine olanak tanımaktadır. Elde edilen dijital ikizlerin sergi gibi projelerde kullanılmasını sağlamaktadır.

5. Dijital İkizi Üretilerek Sürdürülebilirliği Desteklenen Tarihi Yapı Örnekleri

Yenilikçi bir yaklaşım olarak ele alınan dijital ikiz teknolojisi, tarihi yapıları koruma ve yenileme projelerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu teknolojinin koruma amacıyla kullanılmasının önemli nedenlerinden biri yapının zaman içerisinde maruz kaldığı doğal aşınma ve çevresel faktörleri belgelenmesidir.

Dijital ikiz teknolojisinin kullanımının katkıları incelendiğinde hasar analizi ile restorasyon planlaması ve simülasyonların yapılmasının kolaylaştığı, süreç içerisinde zaman ve maliyet tasarrufu sağlandığı, yapının orijinal mimarisinin korunması konusunda hassasiyet oluşturduğu görülmektedir. Yanı sıra dijital ikizler yapıyı sanal gerçeklik ve üç boyutlu modeller aracılığıyla erişilebilir hale getirmektedir. Bu sayede dijital ikizler eğitim, turizm ve araştırma amacıyla kullanılabilmektedir. Tarihi ve dini yapılar, antik kalıntılar, kültürel ve mimari ikonlar, müzeler ve sanat eserleri dijital ikizi oluşturulan kültürel miraslardandır. Bu başlık altında; korunmaya değer dünya mirası niteliği taşıyan ve dijital ikizi üretilmiş üç örnek tarihi yapı olarak Fransa Paris'ten Notre Dame Katedrali, İtalya'dan *Florence As It Was* projesi, İspanya Granada'dan Alhambra Sarayı ve İtalya Roma'dan St. Peter's Bazilikası incelenmek üzere seçilmiştir. Örneklem birimi olarak seçilen yapılar güdümlü (amaçlı) örnekleme yöntemine uygun olarak, araştırma amacı doğrultusunda belirlenmiş ve dijital ikizi etkili sonuç vermiş tarihi yapılar incelenmek üzere seçilmiştir.

5.1. Notre Dame Katedrali

Notre Dame Katedrali, Paris'in Ile de la Cité bölgesinde yer alan ve Gotik mimarinin en önemli yapılarından biridir. İnşası yaklaşık iki yüzyıl sürdüğünden katedralin farklı dönemlerin sanatsal ve mimari unsurlarını bir arada taşıdığı görülmektedir (Notre-Dame de Paris, t.y.). Gotik tarzda başlayan inşaat, zaman içinde barok ve neoklasik dokunuşlarla zenginleşmiştir. Mimarisi, inşa edildiği dönemin ileri mühendislik bilgisini

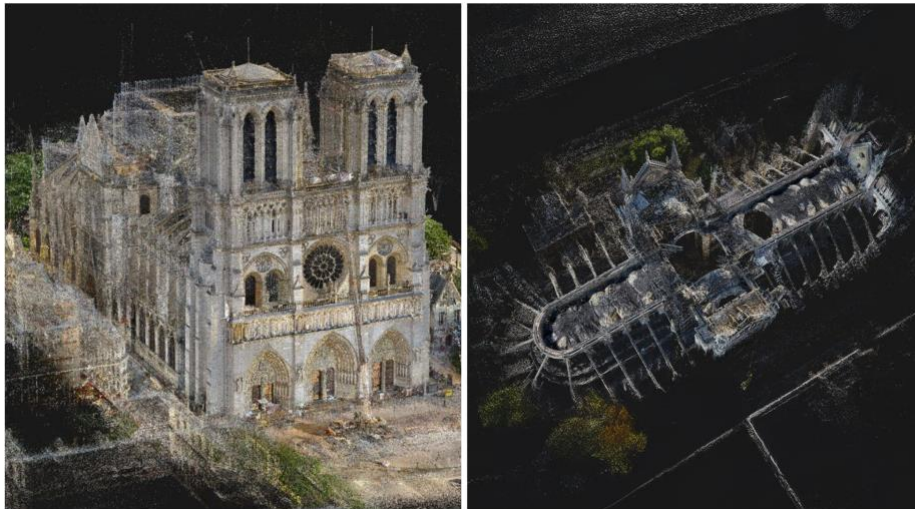
ve taş işçiliğindeki uzmanlığı göstermektedir. 15 Nisan 2019'daki büyük yangının ardından Notre Dame Katedrali'nin korunması, restorasyonu ve yeniden inşası için dijital teknolojiler kullanılmıştır. Geçirdiği yangınla birlikte büyük oranda tahrip olan Notre Dame Katedrali'nin restorasyon sürecinde dijital ikiz teknolojisine yer verilmiştir (Mangon ve Joubert, 2022). Bu süreç hem mevcut hasarın değerlendirilmesi hem de gelecekteki koruma çalışmalarına rehberlik etmesinde, kritik bir adımdır. Oluşturulan dijital ikiz ile katedralin yapısal dayanıklılığını analiz etmek ve gelecekte yaşanabilecek doğal afetlere, yangınlara, insan müdahalelerine karşı önlemler almak amacıyla kullanılmıştır. Yangından sonra belgeleme çalışmalarının Notre Dame gibi kültür hazinelerinin sürdürülebilirliği açısından ne kadar kıymetli olduğu bir kez daha gözlemlenmiştir.

Bu projede, katedralin detaylı bir 3B modelinin oluşturulması için, lazer tarama ve fotogrametri teknikleri kullanılmıştır (Görsel 1). LIDAR teknoloji ve lazer ışınları kullanılarak yapının dış ve iç yüzeyleri taranmış ve milimetrik hassasiyetle üç boyutlu model oluşturulmuştur. Gotik mimarinin getirisi olarak yapının karmaşık taş işçiliği lazer tarama ile kayıt altına alınabilmektedir. Lazer tarama teknolojisi, özellikle yapının yangın sonrası zarar gören bölümlerini belgelemek için kullanılmıştır (Art Graphique ve Patrimoine, t.y.).



Görsel 1. Notre Dame 3B modeli (Studio Alma, 2024, t.y.)

Pek çok projede olduğu gibi bu projede de karma veri toplama ve işleme yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Dronlar yardımıyla yapının ulaşılması güç kısımlarının, dış cephesinin, iç yüzeylerinin, heykellerin ve tüm detayların farklı açılardan görüntüleri toplanmıştır. Fotogrametri yöntemi ile bu fotoğraflardan modeller oluşturulmuştur (Görsel 2) (Art Graphique ve Patrimoine, t.y.).



Görsel 2. Notre Dame Katedrali nokta bulutu verileri (Art Graphique ve Patrimoine, t.y.)

Notre Dame'ın dijital ikizinin oluşturulmasında, yangından önce hazırlanmış belgeleme çalışmaları da kullanılmıştır. Mimar ve tarihçi Andrew Tallon tarafından 2015 yılında yapılan ayrıntılı lazer tarama çalışmaları restorasyon sürecinin hızlanmasını sağlamıştır. 2010 yılında AGP tarafından başlatılan mevcut 3B taramalar kullanılmış ve mevcut durum, gerçeklik yakalama (reality capture) yöntemiyle yeniden kaydedilerek bu veriler güncellenmiştir. Bu verilerin üzerine, mevcut durum modeline ek olarak peyzaj, şehir mobilyaları, yer altındaki yapılar ve kript a gibi kısıtlar oluşturan unsurlar da eklenmiştir. 3B modelleme ve BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) teknolojilerinin bu süreçte önemli bir katkı sağlayacağı öngörülmüştür ve AGP gibi şirketlerle iş birliği yapılarak yangın sonrası katedralin tarama işlemleri başlatılmıştır (Mangon ve Joubert, 2022).

Notre Dame Katedrali'nin yangından sonraki restorasyonunda yapının orijinal haline sadık kalınsa da projede bazı yeniliklere ve farklılıklara yer verilmiştir. Bunun nedeni, güvenlik, sürdürülebilirlik ve modern teknolojilerin entegrasyonu olarak açıklanmaktadır. Güvenlik ve dayanıklılık yangından sonra yapılan restorasyonun temelini oluşturmaktadır. Yapının eski halinde sınırlı olan yangın alarmları, sprinkler sistemleri ve yangın çıkış yolları gibi modern güvenlik önlemleri güncellenmiştir. Restorasyon sürecinde kullanılan 3B tarama teknolojisi ve dijital modeller, katedralin eski halinin doğru bir şekilde yeniden inşa edilmesini sağlamıştır. Yangında tamamen tahrip olmuş meşe kirişli çatı görünüm ve yapımı tamamen korunarak restore edildi, ancak kullanılan ahşap malzeme ve yapısal teknikler, modern yangın güvenliği gereksinimlerine uyacak şekilde iyileştirilmiştir.

5.2. Orsanmichele Kilisesi

Florence As It Was Projesi kapsamında dijital ikizi oluşturulan tarihi bir kilise yapısıdır. Florence As It Was Projesi dünyanın en ayrıntılı, kültürel açıdan zengin şehirlerinden biri olan Floransa için oluşturulmuş bir dijital ikiz projesidir. Bu proje diğer kent dijital ikiz projelerinden farklıdır. Tarihi yapılar bakımından zengin bir bölgenin dijital ikizini kapsamaktadır (Hexagon, 2023). Her biri incelikte tasarlanmış kiliseler ve şapeller her sokağı süslerken içlerinde sanat eserleri bol miktarda bulunur. 60.000 kişiye ev sahipliği yapan şehir, tüm zamanların en ünlü mimari ve sanatsal anıtlarından bazılarıyla çevrilidir.

Projede temel amaç 15. yüzyıl Floransa'sını anlatmak ve bugün bu bölgeyi evlerimizden deneyimlememizi sağlamaktadır. Eski şehri yeniden hayata kavuşturmak için Hexagon'un teknolojisini kullanarak şehrin tarihi simge yapılarının dijital ikizlerini yaratmaktadır. Oluşturulan gerçekçi 3B modeller, orta çağ ve erken modern tarihi gerçek zamanlı keşfedilmesini sağlamaktadır. Bu projede dijital ikizlerin kullanım farklılığı bulunmaktadır. Projenin gerçek zamanlı veri akışı sağlayan sensörlerle desteklenerek projede bulunan her bir yapı için ayrı koruma stratejileri geliştirilebilir, enerji ve kaynak yönetimi yapılabilir. Bu nedenle henüz tamamlanmış bir dijital ikiz çalışması olmasa da geliştirilerek, sürdürülebilirliğe katkı sağlaması mümkün olabilir.

Proje devam etmekte olup, Washington ve Lexington, Virginia'daki Lee Üniversitesi'nden David Pfaff ve George Bent tarafından yürütülmektedir. İtalyan Rönesansı sanat tarihçisi Bent'in sözleriyle, projenin amacı *bu büyük kültür merkezinin, her seferinde bir yapı, blok blok, kademeli olarak yeniden inşa edilmesidir*. Bent'in Floransa'nın tarihi hakkındaki bilgisi ve Pfaff'ın bilgisayar bilimi ve görüntüleme teknolojilerindeki uzmanlığı ile karmaşık yapılardan ve sanat eserlerinden dijital ikizler oluşturulmakta ve ardından her ikize bina açıklamaları, çeviriler, edebi pasajlar, müzik performansları ve hatta vergi kayıtları entegre edilmektedir. Projenin diğer amacı eğitime katkı sağlayabilmektir.; oluşturulan dijital ikiz aracılığıyla öğrencilere yapıların daha iyi tanıtılabildiği vurgulanmıştır. Tarihi yapıların sürdürülebilirliği bağlamında değerlendirildiğinde eğitim amaçlı oluşturulan ikizlerin de gelecek nesillere aktarım açısından kıymetli olduğu vurgulanmaktadır. Ulaşılması güç noktaların dijital ikizler aracılığıyla incelenebilmesinin, araştırmacıları motive ettiği belirtilmektedir.

Florence As It Was projesinin sonraki adımları arasında, tarihi Floransa'yı gösteren 2.000 görüntüden oluşan geniş veri tabanının genişletilmesi, açıklama eklenmesi ve müzik eklenmesi yer almaktadır. Bu noktada dijital ikizlerin turizm amaçlı kullanılabildiğine vurgu yapılmaktadır. Projelerin birçoğunda olduğu gibi Orsanmichele'de de lazer tarama ve LIDAR yöntemlerini kullanılmıştır. Nokta bulutları oluşturarak veriler modellenmiştir. Sahada eş zamanlı olarak akıllı tablet ve bilgisayar yardımıyla veriler ayrıştırılmış ve işlenmiştir. Bu durumun karmaşık verileri işlemede kolaylık sağladığına dikkat çekilmiştir. Bu çalışmanın mümkün olmadığı noktada veriler laboratuvarında incelenerek işlenmiştir. Fotogrametri yöntemi de bu projede kullanılan teknolojilerden biridir. San Lorenzo projesi incelendiğinde araştırmacıların yapı genelinde ulaşılması güç noktaları da lazer tarama yöntemi ile tarayıp nokta bulutu oluşturdukları gözlemlenmektedir. Leica tarafından sağlanan bir yazılım paketi olan Cyclone Register 360 ile projelerdeki parazitler gözlemlenmiş, ayrıştırmalar yapılmış, eksikler ve varsa fazlalıklar tespit edilebilmiştir (Leica Geosystems, t.y.).

Orsanmichele kilisesinin dijital ikiz projesinde bir milyardan fazla nokta bir araya getirilerek detaylı bir mimari model oluşturulmuştur. Bu projede kilisenin tarihî yapısı detaylı şekilde dijitalleştirirken, eskiden içeride bulunan ve sonradan kaldırılan tablolar da fotogrametrik yöntemlerle modele eklenmiştir. Özellikle Aziz Cosmas ve Aziz Damian tablosu, orijinal yerine 3B model içinde geri yerleştirilmiştir (Riggs, 2023). Birden fazla yapı barındıran ve belirli bir bölgeyi kapsayan bir proje olduğundan bu projede GIS (*Geographical Information Systems*) olarak bilinen Coğrafi Bilgi Sistemi kullanılmıştır (Görsel 3).



Görsel 3. Orsanmichele iç mekân 3B lazer taraması (Hexagon, 2023).

5.3. St. Peter's Bazilikası

Vatikan'da bulunan St. Peter's Bazilikası Katolik dünyasının önemli yapılarından biridir. Michelangelo, Gian Lorenzo Bernini ve Bramante gibi ünlü sanatçıların katkılarıyla inşa edilmiştir (San Pietro Bazilikası, t.y.). Günümüzdeki hali 1506-1626 yılları arasında Rönesans ve Barok dönem mimarisinin etkisiyle tamamlanmıştır. İç mekânında geniş kubbe, detaylı mozaikler, Michelangelo'nun ünlü Pietà heykeli bulunmaktadır. Günümüzde aynı zamanda Papalık törenlerine ev sahipliği yapmaktadır. Vatikan'daki St. Peter's Bazilikası, dijital ikiz teknolojisinin kullanıldığı en kapsamlı projelerden biridir. Proje kültürel mirası belgeleme, koruma ve geniş kitlelere erişim imkanı sağlamak amacıyla hayata geçirilmiştir. Yapının tüm detaylarını projeye hassas bir şekilde aktarmak için son teknolojiler, profesyonel bir ekip yardımıyla kullanılmıştır. Yapının detaylı lazer taramaları LIDAR teknolojisi ile yapılmıştır. LIDAR teknolojisi yapının iç mekânındaki ve dış yüzeylerindeki tüm detayları hassas bir ölçümle taramıştır (Microsoft, t.y.).

Fotogrametri yöntemi bu projede kullanılan veri toplama yöntemlerinden biri olmuştur. Pek çok sayıda yüksek çözünürlüklü fotoğraf özel yazılımlar kullanılarak yapının üç boyutlu modeline aktarılmıştır. Dron gibi insansız hava araçları yapının özellikle kubbeli, ulaşılması güç kısımlarından ölçü ve görsel almak için kullanılmıştır. İnsan gözünün algılayamadığı dalga boylarındaki ışıkları (ultraviyole, kızılötesi vb.) kullanarak yüzeyin altındaki detayları ortaya çıkarmayı sağlayan multispektral görüntüleme teknolojisi de bu projede kullanılmıştır. Bu yöntem ile St. Peter's Bazilikası'nın duvar resimleri, mozaikleri ve heykelleri üzerindeki bozulmaları tespit edilmiş ve yapı yüzeylerinin çevresel faktörlerden nasıl etkilendiği analiz edilerek sürdürülebilir koruma stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlanmıştır (Microsoft, t.y.). Elde edilen verilerden model oluşturmak için özellikle CAD yazılımlarının kullanılmıştır. Ek olarak, yapay zekâ destekli yazılımlardan da yararlanılmıştır. Bu nedenle projenin birden fazla yazılım ve teknoloji kullanılarak tamamlandığı belirtilmiştir (Görsel 4) (Microsoft, t.y.).



Görsel 4. St. Peter's Bazilikası dijital ikiz görüntüsü (Microsoft, t.y.).

Dijital ikiz oluşturmak amacıyla yapılan tüm tarama ve analizlerle tarihi yapının çevresel faktörlerden etkilenme süreci izlenmiştir. Böylece yapının gelecek nesillere aktarılması için koruma önlemleri geliştirilmiştir. Elde edilen veriler aynı zamanda, sanal tur uygulamaları için kullanılmış turistlere bu özel yapıyı uzaktan keşfetme fırsatı sağlanmıştır. Sanal gerçeklik platformlarına aktarılan proje akademisyenler ve kültürel miras uzmanlarının da erişimine açılmıştır. Dijital ikiz teknolojisi ile çok kalabalık grupları ağırlayan yapının altyapı problemlerinde de çözüm sağlanmıştır.

5.4. Alhambra Sarayı

Alhambra Sarayı, İspanya'nın Granada şehrinde yer alan, İslam mimarisi ve kültürünü taşıyan bir eserdir (Willmert, 2010). Yapı tarih boyunca çok sayıda saldırıya, doğal afetlere ve zamanın yıpratıcı etkilerine maruz kalmıştır. Kültürel miras niteliği taşıdığı için korunması ve belgelenmesi açısından çalışmalar yapılmaktadır.

Henüz tamamlanmamış olan Alhambra dijital ikiz projesi 2 milyon Euro bütçe ile Granada Belediyesi ve Kültür Bakanlığı ile iş birliği içinde Endülüs Dijital Ajansı tarafından yönetilmektedir. Alhambra'nın çevresi *turizm endüstrisindeki en iddialı yapay zekâ projelerinden birinin* geliştirilmesi için kullanılmaktadır. Amaç, başta Nesnelerin İnterneti (IoT) olmak üzere teknoloji yoluyla ziyaretçi deneyimini iyileştirmektir. Gelişmiş sensörler kullanılarak, fiziksel anıtın doğru ve gerçek zamanlı bir temsili olan El Hamra'nın *dijital ikizini* oluşturmak için veriler toplanmaktadır. Projeyi geliştiren ekip, simülasyonlar geliştirerek, ziyaretçi akışlarını analiz ederek altyapıyı da kontrol etmek istemiştir. Projede ziyaretleri zenginleştirmek için artırılmış gerçeklik kullanılacağı belirtilmektedir. El Hamra'nın odalarından birini ziyaret ederken artırılmış gerçeklik ve akıllı telefonunuz aracılığıyla o odadaki farklı dönemlerdeki yaşamın gerçek zamanlı bir temsili, insanların nasıl etkileşimde bulunduğunu, o zamanın mobilyalarını ve dekorasyonlarını görebilecek bir kurgu planlanmıştır (Williamson, 2023).

Granada'daki Alhambra Sarayı için dijital ikiz projesinde öne çıkan kısım İspanyolca *Torre de la Cautiva* olarak bilinen Cautiva Kulesi'dir. Alhambra'nın duvarlarında bulunan bir kuledir ve tutsak kadının kulesi olarak anılmaktadır. Ulaşılması nispeten daha güç bir alan olduğu için ziyaretçilerin bu alanı deneyimleyebilmesine olanak tanımak amacıyla çalışmalar bu alanda yoğunlaşmıştır. Dijitale aktarılan çalışmaların yoğun bir kısmı burada gerçekleşmiştir. Çalışmalarda yoğunlukla fotogrametri tekniği kullanılmıştır. Bugün sunulan aşamada, proje, bu mekânın 14. yüzyılda yeniden canlandırılmasına olanak tanıyan, uygun şekilde belgelenmiş karakterler ve nesnelerle tamamlanmıştır. Anlatı, günümüzden, esir Hristiyan prensesi efsanesine, oradan da kulenin iç kısmının Nasrid döneminde bir usta tarafından süslenmesine kadar uzanmaktadır. Bütün bunlar Alhambra'yı çevreleyen etnik bir atmosferde görselleştirilmiştir. Dijital yeniden yapılandırma teknolojisi sayesinde duvarlar, zeminler ve pencereler giydirilmiş, mobilyalar eklenmiş ve pencereden ışık, rüzgâr veya manzara canlandırılmıştır. Sahnelerin tamamen animasyonlu olarak gösterilmesi, sesli rehber aracılığıyla yapının ziyaretçiye erişilebilir hale

getirilmesi, turizm ve eğitim amaçlı dijital ikiz kullanımın başarılı örneklerindendir (GVAM, 2020) (Görsel 5).



Görsel 5. Alhambra Sarayı Cautiva Kulesi 3B iç ve dış mekân görselleri (Miopia FX, t.y.).

Kültürel mirasın yayılmasına, korunması ve restorasyonuna yönelik kararların alınmasına, halkın katılımına ve eğlenceye katkıda bulunan uygun fiyatlı, fotogerçekçi 3B modeller ile proje hayata geçirilmiştir. Yapay aydınlatma olanağı olmadığı için RAW görüntüleri kullanılmış, renkler dijital ortamda kalibre edilmiş, malzeme ve doku aktarımının yapılabilmesi için veriler bilgisayar ortamında işlenmiştir. Böylece fotogerçekçi bir sonuç elde edilmiştir. Çalışma çoğunlukla turizmi desteklemek amacıyla kullanıldığı için görselleştirme ve etkileşim teknolojilerinden AR ve VR teknolojilerine yer verildiği görülmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonucun, potansiyel diğer çalışmalar için ufak değişikliklerle HBIM'lerin oluşturulmasına imkân verdiği belirtilmiştir (Benitez vd., 2021).

Buna ek olarak projeye gerçek zamanlı veri akışı sağlayabilen sistemler entegre edilerek kapsamlı bir dijital ikiz oluşturulabileceği düşünülmüştür. Projenin güncel halinin kapsamlı bir dijital ikiz olma yolunda ilerlediği belirtilmektedir. Alhambra Sarayı'nın dijital ikizinin oluşturulması, kültürel mirasın korunması ve gelecek nesillere aktarılması açısından önemli bir kaynak olmuştur. Koruma bilincinin geliştirilmesi için bu projenin hayata geçmesi başarılı bir adım olmuştur. Ziyaretçilerin geçmişi keşfetmesini sağlamak zaman içinde nelerin hayatta kaldığını, nelerin değiştiğini ve yapının nasıl kullanıldığını aktarmak amacıyla kurgulanan proje dijital ikiz çalışmalarının turizm ve eğitim amacıyla kullanılarak sürdürülebilirliğe katkı sağladığına örnek başarılı çalışmalardandır.

6. Değerlendirme, Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada dijital ikiz teknolojisinin tarihi yapıların sürdürülebilirliğindeki destek, enerji verimliliği ve yapı sağlığı izleme süreçlerinde dijital araçların kullanımı ve dijital ikiz kullanımının avantajları ya da dezavantajlarını tespit etmek amaçlanmıştır. İncelenen örnek yapılardan elde edilen bulgular, dijital ikiz teknolojisinin kullanımının tarihi yapıların sürdürülebilirliğinde önemli avantajları bulunduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, teknolojinin kullanımının yaygınlaştığı görülmüştür.

Gerçek zamanlı veri akışı sağlandığından yapılarda oluşabilecek fiziksel hasarların önceden gözlemlenebilmesi, yapıyı koruma ve restorasyon için oldukça etkili rol oynamaktadır. Kimi durumlarda yapı için hayati bir değeri olabilir. Dünya geneline bakıldığında tahrip olmuş yapıların belgelerle yeniden inşa edildiği görülmektedir. Bu nedenle kültürel mirasın sürdürülebilirliği göz önünde bulundurulduğunda dijital ikiz gibi kapsamlı ve nitelikli bir teknolojinin kullanımının yaygınlaşması kaçınılmazdır. Avantajlarının yanı sıra dijital ikiz teknolojisinin dezavantajları arasında, temel problemin maliyet olduğu görülmüştür. Kullanılacak cihazların yanı sıra gerçek zamanlı veri akışı sağlamak için kullanılan sensörlerin

ek maliyeti bulunmaktadır. Sık rastlanan dezavantajlardan bir diğeri de veri toplama ve işleme aşamasında malzeme çeşitliliğine ihtiyaç duyulmasıdır. Ekipman temin etmek, uygun cihazların her zaman ulaşılabilir olmaması, bunun için kapsamlı bütçeye ihtiyaç duyulması diğer bir dezavantajdır. Bu durum araştırmacı ve gönüllülerin bireysel olarak bu alanda çalışma yapmasını engellemektedir. Her ne kadar yüksek maliyet ve teknik zorluklar projelerin önünde engel oluştursa da sağladığı faydalar bu yatırımın değerini ortaya koymaktadır. Dijital ikizler sayesinde yapının koruma ve restorasyon amacıyla belgelenmesi, kaynak yönetimi için veri analiz edilebilmesi, önleyici bakım planlarının yapılabilmesi ve enerji ve altyapı kontrollerinin sağlanabilmesi mümkün olmaktadır.

İlk aşamada literatür taranarak elde edilen veriler doğrultusunda, araştırmanın ikinci aşamasında çoklu durum deseni ile dijital ikizi üretilerek sürdürülebilirliği desteklenen tarihi yapı örneklerinde kullanılan sürdürülebilirliğe katkı yöntemi, veri toplama teknolojileri, modelleme teknolojileri, analiz ve simülasyon teknolojileri ve görselleştirme ve etkileşim teknolojileri Tablo 5'te karşılaştırılmıştır. Tabloda dijital ikiz teknolojilerinin tarihi yapıların sürdürülebilirliğine sağladığı katkılar detaylı bir şekilde ortaya konmaktadır. Elde edilen veriler incelendiğinde, bu teknolojilerin başlıca üç temel alanda etkili olduğu görülmektedir: *Koruma ve restorasyon, turizm ve eğitimde erişim ve kaynak yönetimi ve önleyici bakım.*

Tablo 5. Dijital ikizi üretilerek sürdürülebilirliği desteklenen tarihi yapı örneklerinin analizi.

	Notre Dame Katedrali	Orsanmichele Kilisesi	Alhambra Sarayı	St. Peter's Bazilikası
Sürdürülebilirliğe Katkı Yöntemi	Koruma ve restorasyon Kaynak Yönetimi Turizm ve eğitimde erişim Önleyici bakım Enerji verimliliği ve iklim	Koruma ve restorasyon Turizm ve eğitimde erişim	Koruma ve restorasyon Turizm ve eğitimde erişim	Koruma ve restorasyon Kaynak Yönetimi Turizm ve eğitimde erişim Önleyici bakım Enerji verimliliği ve iklim
Veri Toplama Teknolojileri	LIDAR Fotogrametri 3B Lazer Dron	LIDAR Fotogrametri 3B Lazer	Fotogrametri	LIDAR Fotogrametri 3B Lazer Dron Multispektral görüntüleme sistemleri
Modelleme Teknolojileri	BIM CAD	Cyclone Register 360 BIM GIS	3ds Max	BIM CAD Parametrik Modelleme
Analiz ve Simülasyon Teknolojileri	Yapısal analiz yazılımları Malzeme ve deformasyon simülasyonları	Yapısal analiz yazılımları Nem ve malzeme aşınma simülasyonları İklimlendirme ve hava akışı modellemeleri	IoT	Yapısal analiz yazılımları Nem ve malzeme aşınma simülasyonları Işık ve akustik modelleme Hava akışı ve nem analizi

Görselleştirme ve Etkileşim Teknolojileri	VR AR İnteraktif Dijital Platformlar	VR AR İnteraktif Dijital Platformlar	VR AR İnteraktif Dijital Platformlar	VR AR İnteraktif Dijital Platformlar
---	--	--	--	--

Özellikle Notre Dame Katedrali ve St. Peter's Bazilikası gibi yapılar, dijital ikizlerden yalnızca restorasyon süreçlerinin yanı sıra enerji verimliliği, iklimlendirme optimizasyonu ve yapı sağlığının korunması gibi sürdürülebilirlik açısından önemli alanlarda da faydalanmaktadır. Bu durum, dijital ikizlerin kültürel mirası fiziksel olarak korumanın ötesinde, uzun vadede çevresel faktörlere uyum sağlamasına da yardımcı olduğunu göstermektedir.

Tablo 5'te görüldüğü üzere, incelenen dört örnekte de proje süreçlerinde farklı teknolojiler kullanılsa da sürdürülebilirliğe katkının benzer olduğu gözlemlenmiştir. Her projenin gereklilikleri farklıdır. Dijital ikizin oluşturulduğu dönemde yaygın teknolojiler, projeye ayrılan bütçe, yapının teknik ve estetik özellikleri proje sürecinde seçilen veri toplama, modelleme, analiz ve simülasyon, görselleştirme ve etkileşim teknolojilerinde farklılıklar oluşturmuştur. Çalışmada elde edilen bulgulara göre veri toplama teknolojilerinin her proje için temel unsur olduğu görülmektedir. LIDAR, fotogrametri, 3B lazer tarama ve dron kullanımı gibi yöntemler, yapıların detaylı dijital modellerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. St. Peter's Bazilikası projesinde multispektral görüntüleme sistemlerinin de devreye girmesi, yapı yüzeylerinin analiz edilerek malzeme aşınması ve bozulmaların tespit edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, önleyici bakım süreçlerinin daha etkin yürütülmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, BIM ve CAD teknolojileri ile tarihi yapılar dijital ortamda yeniden oluşturulurken, parametrik modelleme gibi gelişmiş teknikler ile St. Peter's Bazilikası gibi hassas ölçüm gerektiren yapılar detaylı analiz edilebilmektedir. Temelde amaç, yapının sürdürülebilirliğini sağlamak olduğundan dijital ikiz üretim yöntemi ne olursa olsun proje çıktıları benzerdir. Florence As It Was projesine ait Orsanmichele incelendiğinde diğer projelerden farklı olarak çoklu sonuç elde edilmiş ve bu sonuçlar eğitim, kültür, turizm amacıyla da kullanılarak sürdürülebilirliğe katkı sağlamıştır. Florence As It Was projesi ve Alhambra Sarayı dijital ikizlerin kullanım farklılığına da vurgu yapılabilecek projelerdir. Her iki projede de temel amacın eğitim ve turizm olduğu görülmektedir. Yapılara sensörler eklenerek gerçek zamanlı veri akışı sağlanabilir ve hazırlanan üç boyutlu çalışmalara entegre edilerek yapının önleyici bakım stratejileri geliştirilebilir.

Tablodan sunulan bulgular, özellikle yapısal dayanıklılık ve malzeme simülasyonlarının restorasyon süreçlerindeki rolünü göstermektedir. Notre Dame Katedrali ve Florence As It Was Projesi'nde kullanılan yapısal analiz yazılımları, tarihi yapıların statik dayanıklılığının değerlendirilmesini ve zaman içinde oluşabilecek deformasyonların öngörülmesini sağlamaktadır. Buna ek olarak, St. Peter's Bazilikası ve Orsanmichele Kilisesi projelerinde, nem, ışık ve hava akışı simülasyonlarının gerçekleştirilmesi, yapıların uzun vadede korunmasını sağlayacak stratejilerin planlanmasına katkıda bulunmaktadır. Özellikle St. Peter's Bazilikası projesinde ışık ve akustik modellemelerin de kullanılması, yapıların fiziksel sürdürülebilirliğinin yanı sıra deneyimsel sürdürülebilirliğini de sağlamaktadır.

Dijital ikiz kullanımının avantajlarından bir diğeri de turizm ve eğitimde erişilebilirliği artırarak kültürel mirasın geniş kitlelere ulaşmasını mümkün kılmasıdır. Tüm projelerde sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR) gibi görselleştirme ve etkileşim teknolojilerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu teknolojiler, erişilebilirlik bilincine vurgu yaparak tarihi yapıları sanal ortamda deneyimlemelerine imkân tanımakta, ayrıca akademik çalışmalar ve eğitim süreçlerinde materyal olarak kullanılabilirler. İnteraktif dijital platformlar aracılığıyla, ziyaretçilerin yapıları detaylı bir şekilde keşfetmesi sağlanırken, aynı zamanda dijital ikizler, yapıları gelecekte koruma ve tanıtmaya adına önemli bir arşiv görevi üstlenmektedir. Gelecek potansiyele bakıldığında ise dijital ikiz teknolojisinin kullanımının yaygınlaşacağı öngörülmektedir ve bu durum, maliyet azalmasına neden olacaktır. Yeni cihazların gelişmesi ile birlikte üretimin kolaylaşması beklenmektedir. Buna bağlı olarak nitelikli tarihi yapıların sürdürülebilirliğinde önemli ilerleme kaydedilmiş olacaktır. Bu teknik elemanları kullanabilen gerek sahada gerekse dijital ortamda çalışacak birliktişilere ihtiyaç duyulması da bir uzmanlık alanı oluşmasını sağlayacaktır. Araştırmacılar bundan sonraki çalışmalarda veri toplama ve işleme sürecinde kullanılan yeni cihazları tanıtabilir; rehber niteliğinde cihaz kullanımını öğretecek çalışmalar ortaya koyabilirler. Gelecekte yalnızca popüler yapıların değil, daha küçük ölçekli ve yerel tarihi alanların da bu yöntemle dijital ortama taşınması beklenmektedir. Bu sayede dünya mirası daha kapsamlı bir şekilde korunabilecek ve gelecek nesillere aktarılacaktır.

Kaynakça

- Alizadehsalehi, S. ve Yitmen, I. (2023). Digital twin-based progress monitoring management model through reality capture to extended reality technologies (DRX). *Smart and Sustainable Built Environment*, 12(1), 200–236.
- Bedur, C. ve Erbaş, İ. (2024). Yapım sektöründe dijital ikiz kavramının yapı yaşam döngüsü kapsamında SWOT analizi ile değerlendirilmesi. *PLANARCH- Design and Planning Research*. <https://doi.org/10.54864/planarch.1467103>
- Benitez, A. J., Prieto Souto, X., Armenteros, M., Stepanian, E. M., Cantos, R., García-Villaraco, M., Solano, J. ve Gómez Manzanares, Á. (2021). Multi-camera workflow applied to a cultural heritage building: Alhambra's Torre de la Cautiva from the inside. *Heritage*, 5, 21–41.
- Bilici Genç, B., Eskiçi, B. ve Caner, E. (2021). Duvar resimlerinin incelenmesinde yeni yaklaşımlar: Multispektral görüntüleme yöntemleri. *Türkiye Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 25(3), 667-684.
- Boboc, R. G., Duguleană, M., Voinea, G. D., Postelnicu, C. C., Popovici, D. M. ve Carrozzino, M. (2019). Mobile augmented reality for cultural heritage: Following the footsteps of Ovid among different locations in Europe. *Sustainability*, 11(4), 1167.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C. ve Beetz, J. (2018). Building information modeling: Why? What? How? Technology foundations and industry practice. *Springer*.
- Bıçakçı, S. N. (2019). Nesnelerin İnterneti. *Takvim-i Vekayi*, 7(1), 24-36.
- Cantor, D. ve Jones, B. (2012). WebGL beginner's guide. *Packt Publishing*.
- Cardaci, A., Mirabella Roberti, G. ve Versaci, A. (2011). From the continuous to the discrete model: A laser scanning application to conservation projects. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-5/W16, 2011. ISPRS Trento 2011 Workshop, 2-4 March 2011, Trento, Italy.
- Ceylan, E. Z. (2019). Dijital ikizler ve inşaat sektöründeki yeri. *Yapı Bilgi Modelleme*, 1(2). ISSN 2687-4660.
- Dilber, B. ve Özdemir, A. F. (2022). Enerji verimli binaların ısıtma ve soğutma yüklerinin düzenli modeller ile tahmin edilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10, 1091-1106.
- Duran, Z. ve Toz, G. (2003). Tarihi eserlerin fotogrametrik olarak belgelenmesi ve coğrafi bilgi sistemine aktarılması. *İTÜ Dergisi/d: Mühendislik*, 2(6), 19–30.
- Erbaş, H. E. (2022). *Kültür varlıklarının sanal ortamda yeniden işlevlendirilmesi: Yerebatan Sarnıcı sanal sergi örneği* (Tez No: 744723)[Yüksek lisans tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Grieves, M. (2006). *Product lifecycle management: Driving the next generation of lean thinking*. McGraw- Hill Education.
- GVAM. (2020, 12 Ağustos). *A virtual reality tour of the "Torre de la Cautiva" (Alhambra Palace)*. GVAM.
- Halaç, H. H., Şahin, Ş. ve Çatpınar, R. (2023). Tarihi yapılarda algısal bütünleme yöntemi olarak drone teknolojisi. *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 11(140), 33–55. <https://doi.org/10.29228/ASOS.69014>
- Hocaoğlu, M. M. (2022). *Yapı bilgi modellemeden dijital ikize doğru: Akıllı tesis yönetimini etkinleştirme* (Tez No: 772089) [Yüksek lisans tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- ISO/DIS 23247-1. (2020). *Automation systems and integration–Digital Twin framework for manufacturing–Part 1: Overview and general principles*.
- Karasaka, L. ve Beg, A. A. R. (2021). Yersel lazer tarama yöntemi ile farklı geometrik yapıdaki özelliklerin modellenmesi. *Geomatik Dergisi*, 6(1), 54–60. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/geomatik>
- Kaya, Y. ve Yiğit, A. Y. (2020). Dijital el kameraları kullanarak kültürel mirasın belgelenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(2), 33–38.

- Kong, X. ve Hucks, R. G. (2023). Preserving our heritage: A photogrammetry-based digital twin framework for monitoring deteriorations of historic structures. *Automation in Construction*, 152, 104928. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104928>
- Leica Geosystems. (t.y.). *Unveiling the past: Digitally reconstructing Florence*. Leica Geosystems.
- Lewis, M. ve Jacobson, J. (2002). Game engines in scientific research. *Communications of the ACM*, 45(1), 27-31.
- Litavniece, L., Kodors, S., Adamoniene, R. ve Kijasko, J. (2023), "Digital twin: an approach to enhancing tourism competitiveness", *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*, Vol. 15 No. 5, pp. 538-548. <https://doi.org/10.1108/WHATT-06-2023-0074>
- Madni, A. M., Madni, C. C. ve Lucero, S. D. (2019). Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems*, 7(1), 7.
- Mangon, N. ve Joubert, G. (2022, October). Using digital twin technology to restore the jewel of France. *The Journal of the Chartered Institution of Civil Engineering Surveyors*.
- Microsoft. (t.y.). *La Basilica di San Pietro*. Microsoft Unlocked.
- Notre-Dame de Paris. (t.y.). *Home*. <https://www.notredamedeparis.fr/en/>
- Opoku, D. G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R. ve Rashidi, M. (2021). Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 40, 102726.
- Oruç, M. E. ve Baş, G. (2021). Kompleks yapı ve alanlarda yersel lazer tarama teknolojisinin kullanımı. *Türkiye LiDAR Dergisi (Turkish Journal of LiDAR)*, 3(2), 39-47.
- Polat, N. ve Uysal, M. (2016). Hava lazer tarama sistemi, uygulama alanları ve kullanılan yazılımlara genel bir bakış. *AKÜ FEMÜBİD*, 16(4), 679-692.
- Riggs, Z. (2023, 2 Kasım). *A new glimpse of history: Experiencing Florence as it was*. Hexagon Blog. <https://blog.hexagon.com/new-glimpse-history-experiencing-florence/>
- San Pietro Basilica. (t.y.). *St. Peter's Basilica. Vatican Museums*. <https://www.basilicasanpietro.va/en/san-pietro>
- Subaşı, M. ve Okumuş, K. (2017). Bir araştırma yöntemi olarak durum çalışması. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 419-426.
- Turgay, S. ve Akar, N. (2023). Digital twin modeling and simulation of computer aided design and manufacturing structure: Case study. *Digital Manufacturing and Process Management*, 3(1). <https://doi.org/10.23977/dmpm.2023.030101>
- Ulvi, A. ve Yiğit, A. Y. (2019). Kültürel mirasın dijital dokümantasyonu: Taşkent Sultan Çeşmesinin fotogrametrik teknikler kullanarak 3B modelinin yapılması. *Türkiye Fotogrametri Dergisi (Photogrammetry Journal of Turkey)*, 1(1), 1-6. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tufod>
- Uslu, A. ve Uysal, M. (2020). Kültürel mirasın etkileşimli keşfi için mobil artırılmış gerçeklik ve web tabanlı görselleştirme teknolojilerinin kullanılması: Sfenks heykeli örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(6), 1024-1031.
- Wang, Q., Huang, B., Gao, Y. ve Jiao, C. (2023). Current status and prospects of digital twin approaches in structural health monitoring. *Sensors*, 23(3), 1420. <https://doi.org/10.3390/s23031420>
- Williamson, L. (2023, 18 Temmuz). *Alhambra is getting digital twins with the help of artificial intelligence*. In Spain News.
- Willmert, T. (2010). Alhambra palace architecture: An environmental consideration of its inhabitation. In *Muqarnas*, Volume 27 (pp. 157-188). Brill. <https://doi.org/10.1163/ej.9789004185111.i-448.46>
- Yin, R. (1984). *Case study research: Design and methods* (3. baskı). Sage Publications.
- Yiğit, A. Y. ve Uysal, M. (2021). Tarihi eserlerin 3B modellenmesi ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi. *BSEU Journal of Science*, 8(2), 1032-1043.
- Yiğit, A. Y. ve Uysal, M. (2023). Dijital ikiz oluşturmada nokta bulutlarına dayalı analiz. *BSEU Journal of Science*, 10(2), 318-329.

Yiğit, A. Y. ve Uysal, M. (2023). Dijital ikizlerin geliştirilmesinde fotogrametrinin kullanımı ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi. *NOHU Journal of Engineering Sciences*, 12(4), 1372–1384.