

Evaluation of the Digital Twin Concept in the Construction Industry with SWOT Analysis within the Scope of the Building Life Cycle

Yapım Sektöründe Dijital İkiz Kavramının Yapı Yaşam Döngüsü Kapsamında SWOT Analizi ile Değerlendirilmesi

Canan BEDUR¹

Antalya Bilim Üniversitesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, Antalya, Türkiye



İkbal ERBAŞ²

Akdeniz Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Antalya, Türkiye



Received / Geliş Tarihi 09.04.2024
Revision Requested /
Revizyon Talebi 22.05.2024
Last Revision / Son Revizyon 26.08.2024
Accepted / Kabul Tarihi 06.09.2024
Publication Date / Yayın
Tarihi 15.09.2024

Corresponding Author / Sorumlu Yazar:
Canan BEDUR

E-mail: canan.bedur@antalya.edu.tr

Cite this article: Bedur, C. & Erbaş, İ. (2024). Evaluation of the Digital Twin Concept in the Construction Industry with SWOT Analysis within the Scope of the Building Life Cycle. *PLANARCH - Design and Planning Research*, 8(2), 281-294. DOI: 10.54864/planarch.1467103



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ABSTRACT

Technological developments affect and transform the construction industry as well as many other sectors. Today, digital twin technology, which also makes positive contributions to the construction industry, has the potential to transform the industry in the future. In addition to the contributions of digitalization, there are also points that limit the industry. The aim of this study is, to take attention to the digital twin technologies in the construction industry and to reveal the opportunities and threats in the building lifecycle stages. a SWOT analysis was conducted based on a comprehensive review of the existing literature. As a result of the study, the concept of digital twin in the construction industry has been revealed that it offers a holistic perspective to building life cycles and contributes to sustainability and efficiency issues. In addition, it is foreseen that it will provide a holistic perspective between digitalization and all processes of the international level, intersectoral, and building life cycle. It is aimed that the findings of the study will contribute to the future research in this field and to the construction industry experts in practical studies in the field of digital twin technology.

Keywords: Construction industry, Digital twin, Building lifecycle, Technology.

ÖZ

Her geçen gün meydana gelen teknolojik gelişmeler pek çok sektörü olduğu gibi yapım sektörünü de etkilemekte ve dönüştürmektedir. Günümüzde yapım sektörüne de olumlu katkılar sağlayan dijital ikiz teknolojisi, gelecekte sektörü de dönüştürme potansiyeline sahiptir. Ancak günümüzde dijitalleşmenin katkılarının yanı sıra dijital ikiz teknolojisinin henüz yetersiz kaldığı ve sektörü sınırlandırdığı noktalar da bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı yapım sektöründe uygulanan dijital ikiz teknolojilerine dikkati çekmek ve yapı yaşam döngüsü aşamalarındaki mevcut durumu, potansiyellerini ve eksik yönlerini ortaya koymaktır. Bu amaçla çalışma kapsamında detaylı literatür araştırması ile elde edilen akademik çalışmalar incelenerek SWOT analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda yapım sektöründe dijital ikiz kavramının yapı yaşam döngülerine bütüncül bakış açısı sunduğu, sürdürülebilirlik ve verimlilik konularına da katkı sağladığı ortaya konmuştur. Ayrıca dijitalleşme ile uluslararası düzeyde, sektörler arası ve yapı yaşam döngüsünün tüm süreçleri arasında bütüncül bir bakış açısı sağlayacağı öngörülmektedir. Çalışmanın elde edilen bulgularının gelecekte bu alanda yapılacak bilimsel çalışmalara ve dijital ikiz teknolojisi alanındaki pratik çalışmalarda yapım sektörü uzmanlarına katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yapım sektörü, Dijital ikiz, Yapı yaşam döngüsü, Teknoloji

Giriş

Son yıllarda yapım sektöründe dijital teknolojilere olan ilgi artsada yapım sektörü dünyada en yavaş dijitalleşen sektörler arasında yer almaktadır. Sektörün teknolojik gelişmeleri yavaş benimsemesi, teknolojik gelişmeler ile ilgili algılanan riskler ve zorluklar gibi sebeplerle yapım sektöründeki dijital dönüşüm oldukça yavaş ilerlemektedir. Ancak dijital teknolojilerin yapı yaşam döngüsü boyunca verimliliği artıran bilgi ve iletişim teknolojileri olduğu göz önünde bulundurulduğunda sektöre sağlayacağı fayda oldukça açıktır. Endüstri 4.0 ile gelişmekte olan dijital dönüşümün anahtarı konumunda olan “dijital ikiz” kavramı, fiziksel dünyayı dijital dünyaya entegre ederek, sektörler bazında çeşitli zorluklara yanıt bulma potansiyelindedir. Dijital ikiz kavramı gelişimine bağlı olarak, pek çok sektör gibi yapım sektörünü de değiştirme gücüne sahiptir (Chowdhury vd., 2019, Opoku vd., 2021).

Endüstri 4.0 ve beraberinde getirdiği gelişmeler pek çok sektörde üretkenliğin artmasını katkıda bulunurken, enerji tüketiminin azalmasına katkı sağlamaktadır. Hem insanların hem nesnelerin internet bağlantısı sayesinde aralarında ağ ve otomasyon sisteminin kurulmasına odaklanan endüstri 4.0, birçok sektörün gelişimini de yönlendirmektedir. Yapım sektörünün dünyada en çok üretim yapılan ve en çok kaynak tüketen sektörlerden biri olduğu düşünüldüğünde, dijital ikiz teknolojilerinin endüstri 4.0 sürecinde yapım sektöründe önemli bir rol oynama potansiyeli olduğu söylenebilir. Yapım sektöründe endüstri 4.0'ın başarılı olmasının ön şartı, sektörde dijital dönüşümün gerçekleşmesi ve bunun sonucu olarak da sektörde dijital ikizlerden yararlanmaktır. Mevcut dijital modelleme uygulamaları, veri toplama araçlarının kullanımı, insan-bilgisayar-makine arayüzleri, programlanabilir kentlerin yanı sıra BIM modelleri de fiziksel nesnelerin inşaaı, kontrol ve takibi için dijital veriler sağlamıştır. Ancak çift taraflı veri yönetimi ve gerçek zamanlı bağlantı sunma potansiyeli olan dijital ikiz kavramı için BIM modellerinin sunduğu veriler halen yeterli değildir (Lennartsson vd., 2020, Sepasgozar, 2021).

Dijital ikiz kavramı, sektörlerin zorluklarını ele alma konusunda yardımcı olan dijital dünyaya, fiziksel dünyayı entegre etme fırsatı sunar. Otomotiv, imalat gibi uzun süredir dijitalleşmiş olan sektörlerde dijital ikiz uygulamaları yaygın olarak kullanılırken, yapım sektöründe dijital ikiz kullanımı henüz sınırlı olarak kalmıştır (Opoku vd., 2021). Her ne kadar ulusal (Arslan vd., 2019, Ceylan, 2019) ve uluslararası (Kaewunruen vd., 2021, Momeni vd., 2022, Shim vd., 2019) literatürde dijital ikiz kavramı ve uygulamaları farklı açılardan ele alınmış olsa da söz konusu teknolojinin yapım sektöründe sağlayacağı fırsatlar ya da olası tehditler yeterince ele alınmamıştır.

Bu çalışmanın amacı, yapım sektöründe uygulanan dijital ikiz teknolojilerine dikkat çekmek ve yapı yaşam döngüsü aşamalarında barındırdığı fırsatları ve tehditleri ortaya koymaktır. Bu amaçla çalışma kapsamında yapı yaşam döngüsü aşamalarında dijital ikiz kullanımının güçlü yönleri, zayıf yönleri, fırsatları ve karşı karşıya bulunduğu tehditler ortaya konulmuştur. Çalışmada 2013-2024 tarih aralığında çeşitli akademik veri tabanlarında literatür taraması yapılmış, elde edilen akademik çalışmalar gruplanmış ve detaylı şekilde incelenmiştir. Çalışmada SWOT analizi yöntemi uygulanmıştır. Çalışma sonuçları yapım sektöründe yapı yaşam döngüsü aşamalarında dijital ikiz kavramının bütüncül bakış açısı, sürdürülebilirlik ve verimlilik konularına katkı sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, gelişen teknoloji ve sektörde öngörülen dijitalleşmenin katkısıyla hem uluslararası hem de sektörler arası açılardan fayda sağlanacağı ve yapı yaşam döngüsünün tüm süreçleri boyunca bütüncül bir bakış açısı elde edileceği belirlenmiştir. Dijitalleşme ile siber güvenlik kavramının da önem kazandığı ortaya konulmuştur. Çalışma, yapım sektöründe yapı yaşam döngüsünde dijital ikiz kullanımının katkılarını ve sınırlılıklarına dikkati çekmek açısından önem taşımaktadır. Ayrıca bu alanda sınırlı sayıda ulusal bilimsel yayın olması nedeniyle de çalışmanın başta ulusal yazın olmak üzere diğer uluslararası akademik çalışmalara ve sektörel uygulamalara önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

Dijital İkiz Teknolojisi

Dijital ikiz kavramı ilk olarak, 2003 yılında Michigan Üniversitesi'nde Michael Grieves tarafından "fiziksel ürüne dijital eşdeğer" olarak tanımlanmıştır. Dijital ikiz bir nesnenin, nesneye ait parçaların ya da nesnenin ait olduğu sistemin, yaşam döngüsü sürecinde bilgi edinme ve süreçle ilgili karar verme için gerçek zamanlı veri kullanan sanal bir temsilidir. Gerçek zamanlı

çalışabilen ve bağlantıda olduğu kullanıcıya her aşamada simüle edildiği nesne, nesne parçası ya da sisteme ait istenen bilgileri sunabilen dijital ikizler, statik değil, yaşayan dinamik birer varlık olarak karşımıza çıkmaktadır (Ceylan, 2019). Dijital ikiz, yararlandığı teknolojiler ile bağlantılı olarak çalışır. Bu durum da dijital ikiz kavramına genel bir tanım sağlar. Ancak bu genel tanım, sektörler bazında bakıldığı zaman belirsiz ve net değilmiş gibi görünebilir. Bu sebeple dijital ikiz kavramı ile ilgili olarak sektörler bazında tanımlara da ihtiyaç duyulduğu açıktır (Opoku vd., 2021).

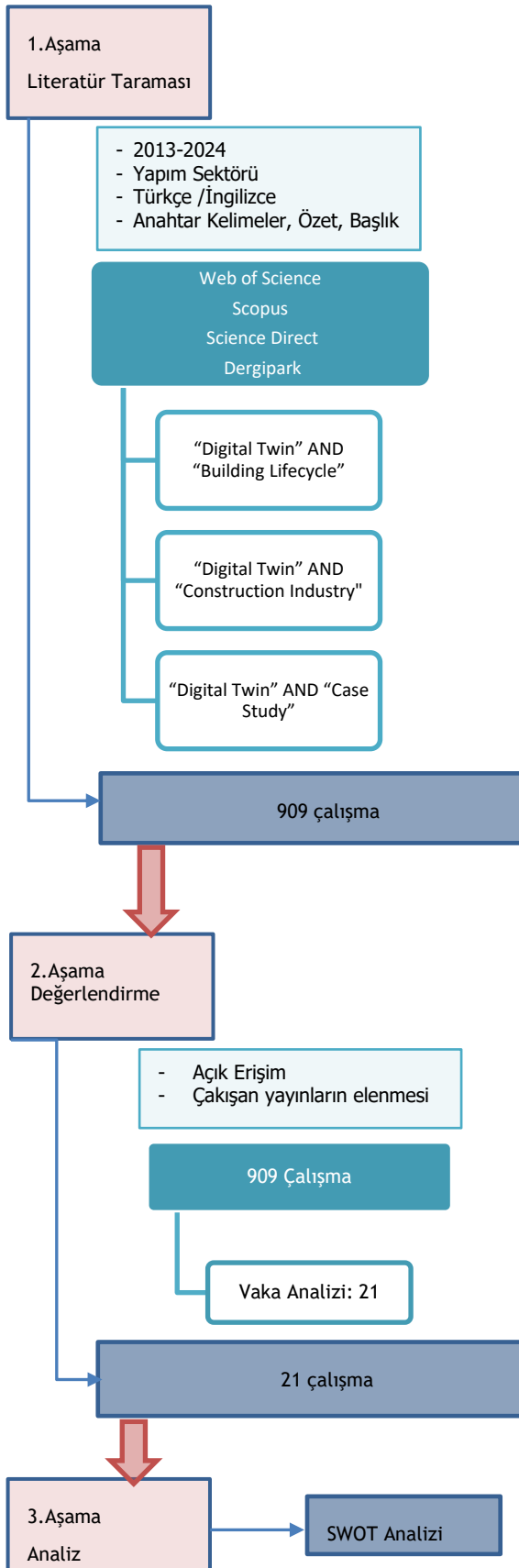
Borth vd. (2019)'ne göre dijital ikiz, sistemlerin ve cihazların çevrelerinde çalışma şekillerinin ve yaşam döngüleri boyunca yaşamını sürdürme biçimlerinin hem unsurlarını hem de dinamiklerini temsil eden fiziksel varlıklarının bağlantılı ve senkronize bir dijital kopyasıdır. Schluse ve Rossmann (2016) ise dijital ikizi, nesnelerin ve hizmetlerin internet içinde akıllı düğümler olarak hareket ederek akıllı nesnelere oluşturan sanal temsiller ve iletişim yeteneklerinden oluşan gerçek dünya nesnelerinin sanal eşdeğerleri olarak tanımlamıştır. Canedo (2016) dijital ikizi, gerçek nesnesine odaklanan gerçek dünya nesnesinin, dijital temsili olarak tanımlamıştır. Gabor vd. (2016) ise, dijital ikiz kavramının, bir sistemin gelecekteki durumunu tahmin etmek için fiziksel nesnenin simülasyonu olduğunu belirtmiştir.

Dijital ikizlerin maliyeti, dijital ikizlerin geliştirilmesi için gereken teknolojinin karmaşıklığına göre değişebilir. Dijital ikizi geliştirmek için gereken bilgi düzeyi de maliyeti etkileyebilir. Bu sebeple bir dijital ikizi yeniden kullanım için tasarlamak, maliyette önemli bir düşüş sağlayabilir. Dijital ikizler, ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da yapı yaşam döngüsü boyunca önemli bir yatırım getirisi sağlar (Madni vd., 2019, Opoku vd., 2021). Dijital ikizin başarılı olmasının 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 zamanında karar verebilmek için veri aktarımının zamanında yapılabilmesi ve bu nedenle de kesintisiz bir bağlantı sağlanabilmesidir. Veri aktarımındaki gecikmeler sebebiyle karar verme aşamalarında yaşanacak olan gecikme, maliyeti etkileyecek unsurlardan olabilir (Akanmu vd., 2021).

Materyal ve Yöntem

Dijital ikiz kavramını yapı yaşam döngüsü özelinde ele alan bu çalışma, (1) literatür taraması, (2) değerlendirme ve (3) analiz olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır. 1. aşamayı oluşturan literatür taraması aşamasında anahtar kelime grubu olarak "Digital Twin" AND "Building Lifecycle", "Digital Twin" AND "Construction Industry" ve "Digital Twin" AND "Case Study" kelime grupları seçilmiştir. Seçilen kelime grupları, Türkçe ve İngilizce olarak, "yapım sektörü" alanı sınırlaması ile anahtar kelimeler, özet ve başlık bölümlerinde Web of Science, Scopus, ScienceDirect ve Dergipark veri tabanlarında taranmıştır. Literatür taraması sonucu elde edilen akademik yayınlardan farklı veri tabanlarında çıkan yayınların elenmesi ve yalnızca açık erişim olan yayınların dahil edilmesiyle toplamda 909 adet akademik çalışmaya ulaşılmıştır. Araştırmanın değerlendirme aşaması olan 2. aşamada 909 yayın içinden yapı yaşam döngüsü kapsamında çalışılmış olan 21 vaka çalışmasına erişilmiş ve bu çalışmalar araştırma evrenine dahil edilmiştir. Yapı yaşam döngüsü kapsamında çalışılmış olan 21 makale, dijital ikizden yararlanma kapsamında değerlendirilmiş ve detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmanın 3. ve son aşaması olan analiz aşamasında ise 2. aşamada incelenen çalışmalar ışığında yapım

sektöründe yapı yaşam döngüsü aşamalarında dijital ikiz kullanımının SWOT analizi yapılmıştır.



Şekil 1. Çalışma Yönteminin Kavramsal Çerçevesi

Öngörü analizleri kapsamında pek çok analiz bulunmaktadır. PESTEL analizi, bir projenin ya da organizasyonun çevresel etkilerini ölçmek için kullanılan bir analizdir. PESTEL analizinde bir organizasyon ya da projenin politik, ekonomik, sosyal, teknolojik, çevresel ve yasal dış faktörlerin olası etkileri ortaya konulur. PESTEL analizi ile paydaşlar, çevresel unsurların uzun vadeli etkilerini öngörebilir ve yatırım kararları konusunda fayda sağlanabilir (Agyekum vd., 2021, Sandberg vd., 2016). Bir diğer analiz yöntemi olan Porter'ın beş gücü analizinde ise, bir sektörde alınacak olan stratejik kararlar için beş temel rekabet gücü göz önünde bulundurulur (Porter, 2001). Porter (2001)'in ortaya koyduğu ilkeler, mevcut rakipler, potansiyel rakipler, ikame ürünler, müşteriler ve tedarikçiler şeklinde belirlenmiştir. Bu ilkeler ile söz konusu sektörün dış faktörlerinin etkileri ortaya konmaktadır. Bir diğer öngörü analizi olan SWOT analizi, bir kuruluşun, teknolojinin, sürecin veya durumun kendi içindeki güçlü ve zayıf yönlerini belirlemede ve dış çevreden kaynaklanan fırsat ve tehditleri saptamakta kullanılan bir teknik olarak tanımlanabilir (Gürlek, 2002). Öngörü analizleri kapsamında araştırılan PESTEL analizi yalnızca dış faktörlerin etkisini ölçmekte, Porter'ın beş gücü analizi ise sektör bazında analiz yapmak için kullanılmaktadır. SWOT analizi ise bir ürün, proje, organizasyon ya da kavramın hem dış hem iç etkilerini ortaya koyarak, genel bir çerçeveye sunmaktadır. SWOT analizi yapılmasının başlıca iki yararı bulunmaktadır. Bunların ilki SWOT analizi yapılan kurum, sistem, süreç ya da teknolojinin mevcut durumunun ortaya konması, diğeri de gelecekteki durumunun tahmin edilebilmesine olanak sağlamasıdır (Aktan, 1999). Çalışmada SWOT analizi yönteminin seçilmesinin nedeni yapıım sektöründe yeni yaygınlaşmaya başlayan dijital ikiz kavramının mevcut durumunun ortaya konulması, gelecekteki potansiyellerinin ve riskli taraflarının tartışılmasına imkan tanınmasıdır. Literatür taraması sırasında, çalışma içinde "digital twin" kavramı geçen Antwi-Afari vd. (2021) tarafından yapıım sektöründeki döngüsel boşluğun ortaya konulması için SWOT analizi yapan bir çalışmaya rastlanmış ancak, "construction industry" ve "digital twin" sınırları içinde SWOT analizi yapan başka bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu sebeple bu çalışmada yapıım sektöründe yapı yaşam döngüsü kapsamında dijital ikiz kullanımına ilişkin genel bir bakış açısı sunabilmek amacıyla SWOT analizi yöntemi seçilmiştir. Sektöre genel bakış sunan çalışmalar ışığında literatür bilgileri özetlenmiş, sonrasında vaka analizi yapan çalışmalardan yararlanılarak da SWOT analizi yapılmıştır. Şekil 1'de çalışmanın kavramsal modeli özetlenmektedir.

Bulgular

Literatür Analizi

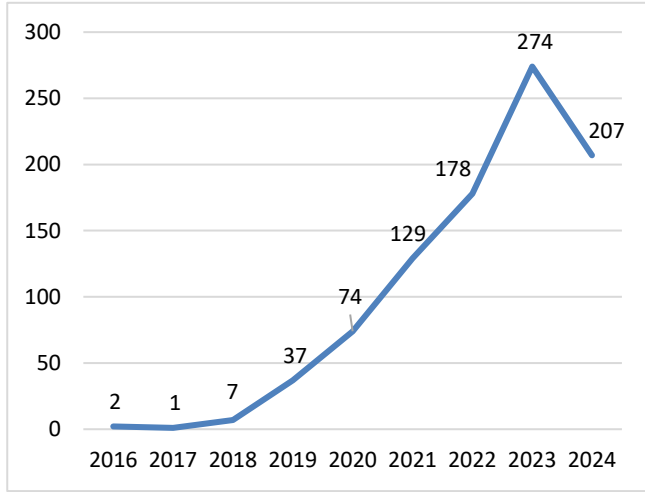
Çalışma kapsamında "Digital Twin" AND "Building Lifecycle", "Digital Twin" AND "Construction Industry" ve "Digital Twin" AND "Case Study" anahtar kelimeleri bir arada kullanılarak araştırma kapsamında yararlanılan veri tabanlarında atılmıştır. Elde edilen 909 akademik yayın arasından, yapıım sektörü sınırlaması dahilinde, yapı yaşam döngüsü aşamalarında çalışılmış olan, İngilizce ve Açık Erişimli 21 adet vaka çalışmasına erişilmiştir. Literatür taraması sonucu elde edilen akademik yayınların, veritabanı bazında dağılımı Tablo 1'de özetlenmektedir.

Şekil 2'de ise literatür taraması sonucu elde edilen 909 akademik çalışmanın yıllara göre dağılımları görülmektedir. Yıllara göre akademik yayın sayısı dağılımı incelendiği zaman, 2016, 2017 ve 2018 yıllarında yapıım sektöründe dijital ikiz kavramının sınırlı sayıda çalışmada ele alındığı, 2019 yılından itibaren ise konuya olan ilginin arttığı söylenebilir. Özellikle 2021 yılından itibaren dijital ikiz kavramı ile ilgili araştırmaların hızlı

bir artışa geçtiği ifade edilebilir. Yıllara göre dağılımda en yüksek akademik yayın sayısı 2023 yılına aittir. Ancak çalışmanın 2024 yılı içerisinde yapıldığı göz önünde bulundurulduğunda, 2024 yılı sonuna kadar dijital ikiz kavramı ile ilgili çalışmaların artacağı öngörülebilir. Tüm bu dağılıma göre pek çok sektörde olduğu gibi yapım sektöründe de dijital ikiz uygulamalarına yönelik ilginin son yıllarda arttığı ve hızla ivme kazandığı görülmektedir.

	1*	2*	3*
Web Of Science	15	151	179
Scopus	31	339	142
Science Direct	140	46	401
Dergipark	2	0	0
TOPLAM **	909		

1*: "Digital Twin" AND "Building Lifecycle"
 2*: "Digital Twin" AND "Construction Industry"
 3*: "Digital Twin" AND "Case Study"
 **: Açık Erişimli ve Farklı Veritabanlarında kesişen çalışmalar elendikten sonra elde edilen yayın sayısı



Şekil 2. Erişilen vaka çalışmalarının yıllara göre dağılımı

Yapım Sektöründe Dijital İkiz Kavramının Ele Alınışına İlişkin Değerlendirme

Bir yapının tasarımdan işletme aşamasına kadar tüm süreçlerine, mimar, mühendis, kullanıcı, işveren gibi pek çok paydaş dahil olmaktadır. Yapı ile ilgili bilgilerin eşzamanlı olarak bu paydaşlar tarafından erişilebilir olması, süreçlere hakimiyetin sağlanması ve farklı paydaşlar tarafından süreçlere iş birliği içinde müdahale edilebilmesi gibi önemli hususlar açısından dijital ikiz teknolojilerinin multidisipliner çalışmalara katkı sağlayacağı açıktır (Ceylan, 2019, Tao vd., 2019). Tasarımcılar proje ile ilgili verimli kararlar almak için dijital ikiz teknolojilerinden yararlanabilir ve böylece projenin "dijital ayak izi"ne sahip olabilirler (Tao vd., 2019). Dijital ikiz kullanılarak toplanan veriler bir veri tabanına kaydedilebilir ve sonraki projelerde tasarımcılar tarafından kullanılabilir (Qi ve Tao, 2018). Dijital ikiz ayrıca malzeme seçimi, enerji yönetimi, ürün tedariği gibi konularda karar verme konusunda da yarar sağlamaktadır. Sürdürülebilirlik, fizibilite çalışmaları gibi erken tasarım kararları da dijital ikiz teknolojileri sayesinde doğru şekilde sonuçlandırılabilir. Proje süreçlerinde yer alan diğer paydaşlar da süreçlere etkin katılım sağlayabilir, etkili planlama sağlanabilir, proje süreçleri her

katılımcı tarafından net şekilde anlaşılabilir ve her aşamada yapılması gerekenlerin farkına varılabilir. Tüm bunlar proje paydaşları arasında etkili iletişim, iş birliği ve karşılıklı güven sağlar (Dubas ve Pastawski, 2017, İlhan ve Yaman, 2016). Bu sebeplerden dolayı özellikle yüksek maliyetli sektörlerde dijital ikiz teknolojilerinin sektöre katkıları önem taşımaktadır.

Madencilik, finans, eğitim, eğlence, hizmet sektörü, sağlık, gayrimenkul, inşaat gibi dünyada önde gelen pek çok sektör arasında yapılmış araştırmalara göre, inşaat sektörü dijitalleşme konusunda en yavaş ilerleme gösteren sektörler arasında yer almaktadır (Agarwal vd., 2016). Sepasgozar (2021) 'ın çalışmasında belirttiği üzere, yapım sektöründe en öncelikli ihtiyaç güvenli ve yüksek hızlı bir ağ kullanarak sürekli ya da gerçek zamanlıya yakın veri alışverişidir. Dijital ikiz oluşturmak için kullanılan teknolojiler, akıllı telefon, video kamera, lazer tarama, VR/AR teknolojileri, insansız hava araçları (İHA/UAVs), nesnelerin interneti (IoT), yapay zeka şeklinde sıralanmaktadır. Ayrıca dijital ikiz kavramı ile "makine öğrenmesi" ve "derin öğrenme" kavramları da karşımıza çıkmaktadır. Tüm bu teknolojilerin ihtiyaca yönelik olarak birkaçının bir arada kullanılması ile veri toplama, veri analizi, verinin bilgiye dönüşümü ve bilgi iletimi odaklı aşamalar sağlanır. Sistem bazında ne kadar çok veri yakalanıp bilgiye dönüştürülebiliyor ve o bilgiden yararlanılabiliyorsa dijital ikizin değeri o kadar artmış olur (Ceylan, 2019). Bu bağlamda dijital ikiz teknolojisinin gelişimi onun entegre olduğu diğre sistemlerle doğrudan ilişkilidir.

Lazer tarama yöntemi, lazer ışınlarının yüzeylere çarpması sonucu görüntü oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Lazer tarama, statik bilgilerin denetimi için doğruluğu yüksek bir kontrol yöntemi sağlar. Lazer tarama yönteminde, hareket halindeki nesnelere ziyade statik nesnelere güvenilirdir sonuçlar vermektedir (Ceylan, 2019). Romanovich vd. (2021)'nin Karaneyaeva (2013) ve Kovarch (2013)'tan aktardığına göre, lazer tarama yöntemi kısa sürede çok miktarda veri toplama sağlaması sebebiyle topografik çalışmalarda yaygın kullanılmaktadır. Ayrıca işçilik maliyetlerinin düşük olması, hacimsel görüntünün korunması gibi avantajları nedeniyle restorasyon ve koruma alanında da kullanılmaktadır.

Sanal gerçeklik ise, bilgisayar kaynaklı üç boyutlu oyunlarda karşılaşılan, kullanıcının bu ortama girdiğinde dünya ile ilişkisinin tamamen yok olduğu, tamamen simüle edilmiş bir ortam olarak tanımlanabilir. Artırılmış gerçeklik (AR) ise gerçek dünya ile bağlantısını devam ettiren, veri ve görüntülerin gerçek dünya görüntülerine eklenebildiği, gerçek ve sanal nesnelerin aynı ortamda birlikte algılanmasını sağlayan bir ortam olarak ifade edilebilir (İçten ve Güngör, 2017).

İnsansız hava araçları (İHA), kamera ve sensörlerle oluşturulan, pilotsuz, uzaktan yönlendirilebilen araçlardır. Gözlem aşamasında çevresel sorunları tespit edebilir, tehlikeleri fark edebilir ve raporlayabilirler. Manevra kabiliyetleri sayesinde iş takibi, denetim, iş kazalarını azaltma, uzak noktalara erişim, geniş alanlara hakimiyet, saha kontrolü, mekânsal analiz gibi amaçlarla kullanılabilirler. Gözle fark edilemeyenler dahil olmak üzere, hasarlı noktaları gece ve gündüz haritalayabilirler. Geleneksel veri toplama yöntemlerine göre çok daha hızlı, güvenilir ve düşük maliyetli çözümler sunabilirler (Ceylan, 2019).

Nesnelerin interneti (IoT), insandan insana, insandan nesneye ve nesneden nesneye iletişimi sağlayan, veri aktarımı, bilgi paylaşımı ve düzenleme, kaynak paylaşımı, içinde bulunulan ortamdaki değişen durumlara tepki verme ve hareket etme kapasitesine sahip açık, kapsamlı ve akıllı bir küresel ağı ifade

etmektedir (Madakam vd., 2015). Kumaş ve Erol (2021)'un Ferguson (2002)'dan aktardığı üzere nesnelerin interneti, içinde yer aldıkları sistemlerin daha verimli üretim sağlamasını, süreçlerinin hızlanmasını, hataların azaltılıp kayıpların önlenmesini sağlarken, karmaşık ve esnek organizasyon sistemlerini olanaklı kılmıştır (Kumaş ve Erol, 2021).

Yapay zeka kavramı insana özgü olan düşünme, öğrenme, karar verme gibi özelliklerin makineler tarafından yapılması olarak tanımlanabilir. Yapay zekaya sahip bir yapı modeli, yapıya ait pek çok bilgiyi öğrenebilir, olası durumlar için çeşitli tepkiler geliştirebilir. Bu teknoloji sayesinde “düşünen yapılar” gelecekte “kendi kendini yöneten yapılar”a evrilebilir (Ceylan, 2019).

BIM modelleri her ne kadar tek başına dijital ikiz oluşturmaya yetmese de, dijital ikizler için model oluşturma konusunda yapım sektöründe önemli bir yer tutmaktadır. BIM, birlikte çalışan yapı bilgilerinin toplanması, depolanması, tesislerin yaşam döngüsünün takibi için gereken proje maliyeti, zamanlama gibi konularda kullanılmaktadır. Bu sebeplerden dolayı BIM, dijital ikiz için bir başlangıç noktası olarak görülür. BIM modellerinin doğruluğu, dijital ikizin de doğruluğunu etkilemektedir (Akanmu vd., 2021).

Dijital ikiz oluşturulmasını sağlayan tüm bu teknolojiler, bir arada ve farklı şekillerde kullanılarak yapı yaşam döngüsü aşamalarına çeşitli katkılar sağlamaktadır. Geleneksel anlamda yapı yaşam döngüsü, tasarım, yapım, kullanım-bakım ve yıkım aşamalarından oluşan doğrusal bir süreçtir (Geçim, 2018). Bir yapı, yaşam döngüsü boyunca, çevresine kalıcı müdahale ile inşaa edilir, işletme-bakım aşamasında uzun yıllar boyunca kullanım ömrünü devam ettirir, kullanım ömrü sona erip yıkım aşamasına geçildiği zaman geride- yapının büyüklüğüne bağlı olarak- atık bırakır. Tüm bu süreçlere bakıldığı zaman yapım sektöründe ortaya çıkan her bir “ürün”ün çevreye etkisi buna bağlı olarak da sektörün etkisi ortaya çıkmaktadır. Şekil 3'te yapı yaşam döngüsü aşamaları görülmektedir (Geçim, 2018).



Şekil 3. Geleneksel Yapı Yaşam Döngüsü (Geçim, 2018).

Baghalzadeh vd. (2022) çalışmasında gelecekte yapım sektöründe dijital ikiz teknolojilerinin, yapay zeka, BIM kullanımı, nesnelerin interneti gibi sistemlerin entegre edilmesiyle birlikte daha yaygın şekilde kullanılacağını öngörmektedir. Tablo 3'te çalışma kapsamında seçilmiş olan 21 adet vaka çalışmasının, yapı yaşam döngüsünün hangi aşamasını ele aldıkları görülmektedir. Tablo 2'de de görüldüğü üzere, mevcut teknolojiler dahilinde dijital ikiz uygulamaları yapı yaşam döngüsü süreçlerinde en yaygın olarak işletme-bakım aşamasında kullanılmaktadır. 2. sırada ise yapım aşaması yer almaktadır. Yıkım-geri dönüşüm aşamasında ise 1 adet çalışmaya erişilmiştir. Tasarım aşaması, dijital ikiz uygulamalarına hazırlık aşaması olduğu için, her ne kadar yapı yaşam döngüsünün ilk adımı olsa da, dijital ikizden yararlanma kapsamında çalışmaya dahil edilmemiştir.

Tablo 2. Erişilen vaka çalışmalarının yapı yaşam döngüsü aşamalarına göre dağılımı

Yazarlar	Yıl	Yapı Yaşam Döngüsü Aşamaları			
		Tasarım	Yapım	İşletme-Bakım	Yıkım-Geri Dönüşüm
Alonso vd.	2024			✓	
Chacón vd.	2024		✓		
Opoku vd.	2024			✓	
Qian vd.	2024			✓	
Wang vd.	2024			✓	
Delgado vd.	2023			✓	
Harode vd.	2023			✓	
Sivori vd.	2023			✓	
Kang vd.	2022				✓
Momeni vd.	2022		✓		
Ni vd.	2022			✓	
Tan vd.	2022			✓	
Wei vd.	2022		✓		
Kaewunruen vd.	2021		✓		
Romanovich vd.	2021			✓	
Tran vd.	2021		✓		
Zhao vd.	2021			✓	
Peng vd.	2020			✓	
Lu ve Brilakis	2019			✓	
Shim vd.	2019			✓	
Qiuchen vd.	2019			✓	

Tablo 3'te ise, çalışma kapsamında erişilen 21 adet vaka çalışmasında, hangi dijital ikiz teknolojilerinden yararlandığı ifade edilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere her çalışmada BIM ya da farklı yazılımlar ile elde edilen 3D modeller yer almaktadır. Buna ek olarak dijital ikizi oluşturmak için en çok kullanılan teknolojiler, nesnelerin interneti (IoT) ve lazer tarama olarak görülmektedir. Yine bazı akademik çalışmalarda birden fazla teknolojinin de bir arada kullanıldığı da tablo 3'te yer almaktadır.

Yapı Yaşam Döngüsü ve Dijital İkiz Kavramının Ele Alınışına İlişkin Analiz

Yapı yaşam döngüsü süreçlerinde uyumlu ve sistemler arası entegre bir yaklaşım dijital ikizler ile mümkündür. Dijital ikiz, yapı yaşam döngüsü boyunca yönetilebilecek çok sayıda dinamik veri sağlar ve aynı zamanda gerçek dünya ile eş zamanlı iletişim kurması sayesinde sürekli güncellenebilen bilgi sağlamaktadır. Uzun vadede dijital ikizlerin yalnızca yapı yaşam döngüsü aşamalarında değil, yapı yaşam döngüsü yönetiminde de fayda sağlayacağı öngörülmektedir (Opoku vd., 2021). Hu vd. (2022) çalışmasında dijital ikizlerin karar verme, gerçek zamanlı izleme, kestirimci bakıma olanak sağlama gibi özellikleri sebebiyle yapı yaşam döngüsünü kapsayabileceğini belirtmiştir.

Tablo 3. Erişilen vaka çalışmalarında yararlanılan dijital ikiz teknolojileri

Yazarlar	Yıl	Dijital İkiz Teknolojisi				
		Lazer Tarama	AR/ VR	(İHA)	(IoT)	Diğer
Alonso vd.	2024				✓	-3D Model -Büyük veri
Chacón vd.	2024	✓			✓	-BIM model
Opoku vd.	2024				✓	-BIM model
Qian vd.	2024	✓		✓	✓	-3D model
Wang vd.	2024	✓				-BIM model -Ek yazılımlar
Delgado vd.	2023			✓		-BIM model -Ek yazılımlar
Harode vd.	2023				✓	-Çeşitli yazılımlar
Sivori vd.	2023				✓	-3D model -Ek yazılımlar
Kang vd.	2022				✓	-BIM model -Ek yazılımlar
Momeni vd.	2022					-BIM model -Ek yazılımlar -Robotik sistem
Ni vd.	2022				✓	-Çeşitli yazılımlar
Tan vd.	2022	✓		✓		-BIM model
Wei vd.	2022				✓	-3D model -Ek yazılımlar
Kaewunruen vd.	2021					-BIM model -Ek yazılımlar
Romanovich vd.	2021	✓				-3D model
Tran vd.	2021	✓				-3D model
Zhao vd.	2021	✓				-BIM model -Ek yazılımlar
Peng vd.	2020		✓			-BIM model
Lu ve Brilakis	2019	✓				-3D model
Shim vd.	2019	✓		✓		-3D model
Qiuchen vd.	2019				✓	-3D model -Ek yazılımlar

Tasarım

Opoku vd. (2021) tasarım aşamasında dijital ikiz teknolojilerinden yararlanarak mevcut fiziksel nesneyi yeniden tasarlamak ya da tasarlanan nesnelerin performansının ölçülmesi amacıyla kullanıldığını tespit etmiştir. Özellikle tasarım aşamasında kullanılan BIM, yapıların olması gerekeni ifade eden sayısal bir temsildir. BIM modeli sanal dünyada var olurken, dijital ikiz ise gerçek yapı ile var olabilmektedir (Ceylan, 2019). Dijital ikizler, yapının fiziksel davranışını eşzamanlı olarak yansıtır ve yaşam döngüsü süreçleri boyunca güncellemeye devam eder. Böylece dijital ikizler dinamik birer varlık olarak sistemde yerini alır. BIM modelleri ise yapının mevcut durumunun sürekli güncellenmiş halini temsil etme yeteneğinden yoksundur. Bu açıdan bakıldığı zaman BIM modellerinin statik birer varlık olduğu söylenebilir (Teicholz, 2013). BIM ve dijital ikizler arasındaki bu fark, BIM modellerinin tek başına dijital ikiz oluşturma konusunda yetersiz kaldığını ancak dijital ikizleri destekleyen bir sistem olduğunu göstermektedir.

BIM özellikle yapı yaşam döngüsünün ilk aşaması olan tasarım aşamasında kullanılmaya başlanması sebebiyle, yapı kullanımı için oldukça önemli verilerin sürecin en başında sisteme dahil olmasını sağlar (Coupny vd., 2021). BIM modeli projenin çeşitli aşamalarında tüm paydaşların katılımıyla ortak şekilde bir araya getirilen bilgilerden yararlanarak ortaya çıkacak olan ürünün iyileştirilmesine yardımcı olur. Bu yönüyle BIM, tasarım aşamasında dijital ikiz fikrinin benimsenmesini sağlamıştır

(Kaewunruen ve Lian, 2019). Ayrıca BIM modelleri gerçek yaşam senaryolarına göre sanal modele veri eklenmesine, verilerin değiştirilmesine ve doğrulanmasına olanak sağlamasıyla süreç boyunca paydaşlar arasında şeffaf bir iletişime katkı koyarak, anlaşmazlıkların giderilmesine de yardımcı olur (Rokooei, 2015).

Xie vd. (2022), yapı yaşam döngüsü süreçlerinde dijital ikizlerden verimli şekilde yararlanılabilmesi için sürecin başı olan planlama ve tasarım aşamasında sisteme doğru ve fazla veri girişinin, ilerleyen süreçlerde karar verme konusunda önem taşıdığını belirtmiştir.

Tasarım aşamasında oluşturulan BIM modeli sanal dünyada var olurken, dijital ikiz ise gerçek yapı ile var olabilmektedir (Ceylan, 2019). Yani dijital ikizden bahsedebilmek için yapının yapım aşamasına geçilmiş olması gerekmektedir. Bu sebeple geleneksel yapı üretim sisteminin ilk adımı olan tasarım aşaması çalışmaya dahil edilmemiştir.

Yapım

Yapım aşamasında dijital ikizlerin rolü maliyeti etkili ve verimli şekilde azaltmak, geleneksel yöntemin sağlayamayacağı kaliteyi artırmaktır. Opoku vd. (2021) yapım aşamasında dijital ikizlerin, gerçek zamanlı izleme, üretim kontrolü ve üretim planlaması aşamalarında kullanıldığını tespit etmişlerdir.

Yapım aşamasında üretim ilerleyişini takip etmek, yapılan işin yerini tespit etmek ve ölçmek için GPS, malzeme ve işçi konumlarını takip etmek için etiket tanımlama sistemleri ve

inşaat kalitesini izlemek için akıllı sensörler ve sensör ağları gibi çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. Ayrıca kaynak yönetimi, malzeme yönetimi, program yönetimi, kalite yönetimi gibi çeşitli yönetim süreçleri ile ilgili olarak da dijital ikizlerden yararlanılmaktadır (Opoku vd., 2021). Yapım aşaması sonucunda tasarlanan ürün bitmiş ürüne dönüşmektedir. Bu sebeple yapım aşamasında kullanılan dijital ikiz teknolojileri bu aşamadaki sistem bütünlüğüne odaklanmaktadır (Angjeliu vd., 2020). Yapım aşamasında yer alan bir diğer önemli unsur saha koşullarının (hava durumu, saha tozu vs.) veri iletimini etkilememesi gereğidir. Veri iletimi ne kadar doğru ve eşzamanlı olursa dijital ikizin doğruluğu o kadar artar (Jiang vd., 2022).

Chacón vd. (2024), süreç yönetimi ve üretim kontrolü sağlamak için çalışmada dijital ikizden yararlanmıştır. Bu amaçla betonarme yapım aşamasında bulunan bir yapı seçilmiştir ve lazer tarayıcılar ile yapının dijital ikizi oluşturulmuştur. Teknolojik altyapının tam anlamıyla hazır olmaması sebebiyle gerçek zamanlı karar alınamaması, çalışmanın kısıtlarını oluşturmuştur. Paydaşlar çalışmada daha gelişmiş teknoloji hazırlığının önemini belirtmişlerdir.

Wei vd. (2022), çalışmada saha dışı üretim aşamaları için bir dijital ikiz oluşturulmuştur. Bu amaçla ahşap panelli bir yapının üretim süreci seçilmiştir. Sensörler aracılığıyla veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar sistemin özellikle veri girişinin, manuel çalışma oranının daha yüksek olduğu ifade etmişlerdir. Manuel veri girişine bağlı olarak, eşzamanlı ilerleme süreci sağlanamaması sonucu karar verme süreçlerini de etkilediğini belirtmişlerdir.

Kaewunruen vd. (2021), Çin'de bulunan bir köy köprüsünden elde edilen veriler ile bir dijital ikiz çalışması yapmışlardır. Model oluşturma, bilgi toplama- paylaşma, veri işleme, denetim ve bakım planlaması için dijital ikizlerin uygulamalarından yararlanılan çalışma sonucunda dijital ikizlerden yararlanarak bir "köprü risk inceleme modeli" oluşturmuşlardır.

Tran vd. (2021), prefabrike bir yapının cephesinin yapım aşamasında lazer tarama ile kalite kontrolünü sağlamışlardır. Çalışma sonucunda prefabrike yapılar için yapım sürecinde verimli görsel kalite değerlendirmesi sistemi olarak lazer tarama ile dijital ikizlerden yararlanılabileceğini önermişlerdir.

İşletme-Bakım

Opoku vd. (2021) işletme bakım aşamasında, kestirimci bakım, arıza tespiti ve durum izleme için dijital ikizlerin kullanılabilirliğini tespit etmişlerdir. İşletme ve bakım aşaması yapının işletmecinin kontrolüne geçtiği aşamadır. Bu aşamada yer alan paydaşların, yapının sanal modeline erişimi ve verilerini yönetmesi önceki aşamalara göre daha zordur. Ayrıca bu aşamada inşaa edilmiş yapı ile yapının sanal modeli arasında farklılıklar olabilir. Dijital ikiz teknolojisi işletme-bakım aşamasında da proje paydaşlarının katılım sağlamalarına ve paydaşlar arasındaki bilgi akışına olanak verir (Anderl vd., 2018).

Alonso vd. (2024) çalışmada İtalyan bir firmanın kullanım aşamasındaki ofisini ele almıştır. Nesnelerin interneti, büyük veri ve 3D model teknolojilerinin bir arada kullanılmasıyla seçilen firmaya ait bir ofisin dijital ikizi oluşturulmuştur. Dijital ikizdeki bilgiler bu çalışma için halka açık şekilde sunulmuştur. Sonrasında sistemin kullanıcı deneyimi ölçülmüştür. Kullanıcılar firma çalışanlarından oluşan 20 kişilik bir grup olarak belirlenmiştir. Kullanıcılara yapılan anket sonucunda sistemin basit şekilde kullanılabilirliği, ek detay bilgiye ihtiyaç duymadıkları, sistemde çok az tutarsızlık bulunduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

Opoku vd. (2024), çalışmada tesis yönetimi aşamasında dijital ikizin daha geliştirilmiş bir modelini oluşturmayı amaçlamıştır. Çalışma kapsamında Western Sydney Üniversitesi'ne ait kütüphane binası seçilmiştir. Yapı içi iklimlendirme sistemi çalışmaya dahil edilmiştir. Çeşitli sensörler, nesnelerin interneti teknolojisi ve BIM gibi yazılımlardan yararlanılmıştır.

Qian vd. (2024), çalışmada Çin'in Fujan kentinde bir konut yapısını seçmiştir. Bölgede yaşayan halkın %50'si astım, bronşit, solunum bozuklukları gibi kronik rahatsızlıklara sahiptir. Bu nedenle çalışmada iç mekan hava kalitesi ölçümü ve kontrolü amaçlanmıştır. Bu amaçla seçilen bir konut yapısının dijital ikizi oluşturulmuştur. Seçilen konutun modeli, üç boyutlu lazer tarama, nesnelerin interneti ve insansız hava araçları teknolojilerinden yararlanılarak oluşturulmuş sonrasında dijital ikize geçilmiştir. Çalışma sonunda mevcut teknolojilerin sistem kurulumuna ve kullanımına olanak sağladığı, dijital ikiz teknolojilerinin gelişmesi ile daha doğru ve eşzamanlı bilgi alınabileceğini belirtmişlerdir.

Wang vd. (2024), çalışmada Çin'de konut olarak kullanılan geleneksel tarihi bir yapı seçmiştir. Çalışmada tarihi yapının kullanım aşamasında kullanıcıların doğru yönlendirilmesi, enerji kontrolünün verimli şekilde yapılması ve bunların katkısıyla da mimari mirasın daha iyi şekilde korunması hedeflenmiştir. Dijital ikizi oluştururken lazer tarama ve çeşitli yazılımlar kullanılmıştır. Araştırmacılar çalışmanın sınırlılıklarını maliyet sebebiyle her kullanıcıya veri toplayıcı işaretçi verilememesi olarak belirtmiştir. Bu da kullanım aşamasında veri aktarımını etkilemektedir.

Delgado vd. (2023), çalışmada yapı içi iklimlendirme sistemlerinin izlenmesi amacıyla Portekiz'de yer alan tek katlı bir ahşap konutu seçmiştir. Dijital ikizi oluşturmak için insansız hava araçları ve çeşitli yazılımlardan yararlanılmıştır. Enerji verimliliğini artırmak için dijital ikizin bir yöntem olabileceği önerilmiştir.

Harode vd. (2023), çalışmada kullanım aşamasında dijital ikiz aracılığıyla bir sağlık tesisini takip ve kontrolünü sağlamayı amaçlayarak, Colorado'da bir sağlık tesisi seçmiştir. Dijital ikizi oluşturmak için kullanılan teknolojiler nesnelerin interneti ve takip sağlayabilmek için çeşitli yazılımlardır. Çalışma sonucunda dijital ikiz uygulamalarının mevcut olanakları ile kullanım aşamasında takip ve gözlem için düşük maliyetli bir prototip oluşturmuşlardır.

Sivori vd. (2023) çalışmada sismik açıdan hareketli bir bölgede bir dijital ikiz geliştirmek ve sürekli güncellenmesini sağlayan bir model oluşturmak amacıyla İtalya'da bulunan Consoli Sarayı'nı seçmiştir. Tarihi yapılarda dijital ikizin kullanımının etkin risk yönetimi ve kültürel mirasın sürdürülebilirliği konularına katkı sağlayacağını belirtmişlerdir.

Ni vd. (2022), yapı içi hava niteliğini kontrol ve takip etmeyi amaçladığı çalışmada İsveç'te yer alan bir şehir tiyatrosu binasını seçmiştir. Çalışma kapsamında yapının farklı mevsimlerde, farklı kullanım zamanlarında (seyircili-seyircisiz) iç hava kalitesinin ölçülebilmesi sınanmıştır. Yapı içine yerleştirilen sensörler aracılığıyla nesnelerin interneti teknolojisiyle belirli zaman aralıklarında yapı içi hava niteliğiyle ilgili veriler toplanarak dijital ikize iletilmiştir. Araştırmacılar dijital ikizde daha fazla sensör kullanılması ile daha çok verinin sisteme aktarılabilirliğini ifade etmişlerdir. Dijital ikizden elde edilen bilgiler, iç ortamın hava kalitesinin artırılmasına katkıda bulunmuştur.

Tan vd. (2022), çalışmasında dijital ikiz aracılığıyla tarihi yapıların verilerinin kaydedilmesi, incelenmesi ve korunmasını amaçlamıştır. Bu amaçla Çin'in güneybatısında yer alan tarihi bir yapıda yer alan Xuanluo salonu seçilmiştir. Dijital ikizi oluşturmak için lazer tarayıcı ve insansız hava araçları teknolojilerinden yararlanılmıştır. Araştırmacılar çalışılan yapının ölçeğinin küçük olması sayesinde veri takibinin kolay yapılabilirdiğini ifade etmişlerdir.

Romanovich vd. (2021) tarafından 1950lerde yapılmış ve yenilenme gereksinimi bulunan bir tünelin dijital ikizi nokta bulutlarını kullanarak lazer tarama yöntemi ile oluşturulmuştur. Nokta buluta dayalı bir model oluşturmanın, hazır çizimlere dayalı bir model oluşturmaya kıyasla avantajları bu çalışmada ortaya konmuştur. Yapının çok eski olması sebebiyle yapıya ait çizimlerin ve dökümanların yeterli derecede kaliteli olmaması ve yalnızca kâğıda basılı formatta olması sebebiyle dijital ikiz oluşturma çalışmasına geçmeden önce yapıya ait dökümanların ve çizimlerin yeniden oluşturulması gereği ortaya çıkmıştır. Lazer tarama yöntemi ile bitmiş yapının çizimleri hızlı bir şekilde yeniden oluşturulmuştur. Çalışmadaki yapı kültürel miras kapsamında bir yapı olduğu için yapıya ait bazı tesislere ulaşımında zorluk yaşanmıştır ve süreci yavaşlatmıştır. Ancak lazer tarama yönteminin proje organizasyonu sürecinde zaman kazandırdığı ve toplam sürede kazanç sağlandığı ortaya konmuştur. Ayrıca yazarlar yeraltı kompleksi oluşturmak için lazer tarama yönteminin kullanılmasının, tasarım aşamasındaki olası sorunları ve hataları tespit etmekte yardımcı olduğunu ortaya koymuşlardır. Yazarlar metro istasyonu gibi eğimli alanlarda noktaların sisteme manuel şekilde girişinin de yapılmasının gerekli olduğunu belirtmişlerdir.

Zhao vd. (2021), enerji verimliliğini iyileştirmek ve bina enerji talebini karşılamak için temiz enerji kullanmayı amaçlayan, neredeyse sıfır enerjili bina konseptine dayalı olarak mevcut binaların güçlendirme planını değerlendirme amacıyla Çin'in Dezhau kentinde mevcut bir yapının bina enerji modelini oluşturmuştur. Bu amaçla BIM ve lazer tarama yöntemini birlikte kullanarak çalıştıkları yapının dijital ikizini oluşturmuşlardır. Çalışma sonunda Zhao vd. (2021), bina enerji modeli çalışmalarında dijital ikiz modellerin kullanılabilirliğini ve böylece minimum hata ile doğru model çalışması üzerinden verimli sonuçlara ulaşılabilirliğini belirtmişlerdir.

Peng vd. (2020), Çin'in Şangay kentinde yer alan East Hospital'da işletme-bakım aşamasında bir yıldan uzun süredir yürütülen dijital ikiz projesini incelemiştir. Eski klinik binasına göre %10'luk bir oranda yönetim memnuniyetinde artışı, enerji tasarrufu konusunda bir yılda %1'lik tasarruf yapıldığını ortaya koymuştur. Ayrıca dijital ikiz sayesinde arıza ve onarım taleplerinin %10'dan fazlasının önlendiğini ortaya koymuşlardır. Yapıya ait dijital ikiz planlaması tasarımın erken dönemlerinden itibaren titizlikle sürece dahil edildiği için yapıya ait işlevsel bir dijital ikiz kurulmuştur. Ayrıca bu sistemin dünyanın diğer bölgelerindeki hastanelerde problem çözüme konusunda örnek olacağı belirtilmiştir. Tüm bunların yanı sıra örnek çalışmada halen eksik olan kısımlar yazarlar tarafından ortaya konmuştur. Bunlardan biri hastane binasındaki tıbbi sistemlerde meydana gelen bakım-onarım ihtiyacının dijital ikizin sağlayabileceği kapsamdaki büyük olmasıdır. Bu nedenle mevcut dijital ikiz arızalı tıbbi ekipmanın kontrolünü gerçekleştirememiş, yalnızca hangi sistemde arıza varsa onunla ilgili gerçek zamanlı bildirim sağlamış ve ihtiyaç duyulan onarım işlemleri personel tarafından giderilmiştir (Peng vd., 2020).

Lu ve Brilakis (2019) çalışmalarında mevcut betonarme köprülerin dijital ikizlerinin oluşturulması konusunda bir

araştırma yapmışlardır. Nokta bulut sistemi ile dijital ikiz oluşturulan dijital ikizlerin doğruluğunun sağlanabilmesi için, insan eliyle de sisteme giriş yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Mevcut köprülerin düzensiz geometrisi sebebiyle nokta bulut yöntemi kullanılarak sağlıklı bir dijital ikiz elde etmenin mümkün olmadığını vurgulamışlardır. Bu duruma çözüm olarak ise, "dilimleme tabanlı nesne yerleştirme yöntemi" sunarak daha kısa sürede ve doğru şekilde dijital ikizi oluşturabildiklerini belirtmişlerdir. Lu ve Brilakis (2019) bu yöntemle manuel şekilde müdahalenin giderek azaltılabileceğini ve böylece daha doğru oluşturulmuş dijital ikiz elde edilebileceğini vurgulamışlardır.

Dijital ikizler aynı zamanda köprü gibi büyük yapıların bakım çalışmalarında da yarar sağlamaktadır. Shim vd. (2019) köprülerin bakım çalışmaları ile ilgili bir çerçeve sunmuşlardır. Tüm paydaşların ve işletme-bakım aşamasında görevli kişilerin erişebileceği bir dijital ikiz sayesinde zaman ve kaynak tasarrufu sağlayarak köprü bakımının mümkün olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca hasar geçmiş ve onarım konusundaki veriler dijital ikiz sayesinde herhangi bir zaman diliminde kolaylıkla erişilebilir ve maliyet etkin bir çerçevede köprü bakımı için uzun vadeli bir stratejik plan oluşturulabilir. Köprü yüzeyinde yer alan hasarlar otomatik olarak tespit edilebilir ve gerçek zamanlı olarak teknik geri bildirim sisteme ulaştırılabilmektedir. Geleneksel yöntemlere göre iş tekrarı ve veri kaybı önlemede dijital ikizler oldukça etkilidir (Shim vd., 2019). Bir köprünün yaşam döngüsü süresinin ortalama yüz yıl olduğu düşünüldüğünde veri kaybetmemenin önemi birkez daha ortaya çıkmaktadır (Kaewunruen vd., 2021).

Qjuchen vd. (2019), Vaka çalışmasında Cambridge bölgesinde 3 katlı bir bina seçmiştir. Veri toplama için nesnelerin internetinden yararlanılmıştır. Amaç yapının kullanım aşamasında farklı bölgelerinin süreçlerini yönetebilmektir. Çalışma sonunda teknolojinin gelişmesiyle insan ve dijital ikizler arasında daha çok etkileşim olacağı ve yapıların kullanım aşamasında dijital ikizlerden daha verimli yararlanılacağı öngörülmüştür.

Yıkım-Geri Dönüşüm

Yapı yaşam döngüsünün son aşaması olan yıkım aşamasında yapının davranışlarına ilişkin bilgi kaybolur. Ancak yapının benzer özellikler taşıyan gelecekteki yapılar için bir veri tabanı sağlama olanağı dijital ikiz teknolojileri ile ortaya çıkmıştır. Ömrünü dolduran yapılar, tasarımdan yıkım aşamasına kadar yapının tüm süreçleriyle ilgili bilgileri dijital ikizinde saklar. Bu sayede gelecekteki yapılarda karşılaşılabilecek olası sorunlar, çözüm alternatifleriyle birlikte gelecek projelere ışık tutabilir (Opoku vd., 2021). Ayrıca bu sayede sanal ortamda minimum maliyetle gelecek projeler için hazır veri bulundurulabilir (Liu vd., 2021). Ek olarak dijital ikiz, geleneksel yapı yaşam döngüsü süreçlerinden farklı olarak yıkım aşamasında, atık yönetimi ve geri dönüşüm işlemlerine de katkı sağlayabilmektedir. Yapının yıkım ve kullanım aşamasında kullanılan tüm malzemeleri, metraj ve maliyet bilgileriyle birlikte dijital ikizde yer aldığı için yapının yıkım aşamasında geri dönüştürülebilecek ürünlerin tasnifi, kolaylıkla yapılabilir. Bunun için gerçek yapı ile dijital ikizin birbirleriyle tutarlı olması gerekmektedir.

Kang vd. (2022), yıkım aşamasında atık yönetiminin kontrolü ve takibini amaçladığı çalışmasında, Hong Kong'da bulunan 2 adet bina seçmiştir. Bu binalardan biri Hong Kong Üniversitesi Ana Binası, diğeri de Hong Kong Konut İdaresi tarafından inşaa edilen çok katlı bir konut yapısıdır. Yapıların BIM modelleri oluşturulmuş ve malzeme türleri, özellikleri, konumları modele veri olarak aktarılmıştır. Konut yapısında yapının prefabrik dış

cephesi çalışmaya dahil edilmiş, beton ve metal ürünler dikkate alınmıştır. Yıkım aşamasında gerçekleştirilen atık yönetimi için yıkımın gerçek zamanlı durumu, nakliye, taşıma, ulaşım planı, maliyet gibi aşamalar çalışma kapsamına alınmış ve tüm bu süreçler dijital ikiz sistemiyle kullanıcılara veri olarak sunulmuştur. Çalışmada dijital ikiz katkısı ile yıkım aşamasında geri dönüşüm ve atık yönetiminin, geleneksel yöntemlere göre daha verimli şekilde gerçekleştirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

SWOT Analizi

Pek çok sektörde olduğu gibi yapı sektöründe de dijital ikiz kavramının katkıları akademik çalışmalarla ortaya konmuştur. Dijital ikizlerin mevcut katkıları, sistemin güçlü yönünü oluşturur. Güçlü yönler süreçlerin işleyişine ve sektör bütününe fayda sağlar. Zayıf yönler ise geliştirilmeye ihtiyaç duyulan ve geliştirildiği zaman güçlü yön olarak sistemde yerini alabilecek yönlerdir. Fırsatlar dijital ikizler sayesinde elde edilebilecek diğer imkanları ortaya çıkarır ve bir anlamda dijital ikizlerin potansiyelini ortaya koyar. Tehditler ise sistemin zayıf yönlerinin ötesinde önlem alınması gereken durumları belirtir.

Çalışmanın 2. aşamasını oluşturan değerlendirme aşamasında çalışma kapsamında incelenen kaynaklar doğrultusunda yapı sektöründe dijital ikiz kavramının yapı yaşam döngüsü aşamalarındaki mevcut kullanım durumu ile ilgili SWOT analizi yapılmıştır. SWOT analizi ile yapı sektöründeki dijital ikiz uygulamaları akademik çalışmalar ve örneklerle incelenmiş, sistemin güçlü yönleri, zayıf yönleri, fırsatları ve tehditleri ortaya konmuştur.

Yapım sektöründe yapı yaşam döngüsünde dijital ikizlerin güçlü yönleri şunlardır:

- **Bütüncül bakış açısı:** Dijital ikiz kavramı fiziksel dünyayı dijital dünyaya entegre ederek, yapı yaşam döngüsünün her aşamasında zorlukları ele almada kolaylık ve bütüncül bir bakış açısı sağlar.
- **Etkili süreç yönetimi:** Gerçek yapıya ait bir dijital ikiz sayesinde, yapı yaşam döngüsünün her aşamasında her türlü senaryo olasılığı görülebilir. Bu sayede her aşamada yapılması gereken adımlardan erken dönemlerde haberdar olunur ve böylece yapı yaşam döngüsünün her aşamasında etkili süreç yönetimi sağlanabilir. Tasarım aşamasında optimum çözümler sunulabilir. Yapım aşamasında maliyet, kalite ve süre dengesi sağlanabilir, işletme-bakım aşamasında da yapının kullanımı sırasında oluşan aksaklıklar giderilebilir, mevcut bakımlar aksatılmadan yapılabilir.
- **Etkili paydaş katılımı:** Dijital ikizler her aşamada etkili paydaş katılımına olanak sağlar. Proje paydaşları her aşamada proje ile ilgili verilere doğrudan ulaşabilir. Böylece şeffaf iletişim sağlanır, anlaşmazlıklar ortadan kalkar.
- **Dijital ayak izi sağlama:** Yapıya ait dijital ayak izi sayesinde, yapı ömrünü doldursa bile gelecekte üretilecek olan benzer yapılar için veri sağlayabilir. Böylece ilerleyen dönemlerde üretilecek olan benzer yapılar için üretim aşamalarında dijital ikizi ilk kez oluşturulan yapılara göre daha hızlı ve sorunsuz ilerleme sağlanabilir. Ayrıca karşılaşılabilecek aksaklıkların gerçekleşmiş olanları dijital ikiz veri tabanında depolandığı için, yeni üretilecek yapılarda karşılaşılan aksaklıkların giderilmesinde de yol gösterici olabilir.
- **İşçilik maliyetlerinde düşüş:** İşlevsel bir dijital ikiz ile, yapı yaşam döngüsünün bazı aşamalarında insan gücünden bağımsız çalışmalar yürütülebilir. Bu da işçilik maliyetlerinde düşüş sağlar.
- **Kalitede artış:** İnsan gücüne bağımlılığın azalması ile geleneksel üretimin sağlayamayacağı kalite sağlanabilir.

- **Enerji tüketimi takip-kontrol:** Dijital ikiz ile kullanım aşamasında da yapının enerji tüketimi takip ve kontrol edilebilmektedir.

- **İşletme-bakımda kolaylık:** Metro istasyonu, tünel, köprü gibi ulaşım yapılarının işletme-bakım aşamasında meydana gelen hasarların bakımı, geleneksel yöntemlere göre daha kontrollü ve etkili şekilde sağlanabilmektedir. Ayrıca bu büyük yapıların bakımı sırasında oluşan kaynak tüketimi de kontrol altında tutulabilmektedir. Üretimi konut, işyeri gibi küçük ölçekli yapılara göre daha zor ve maliyetli olan üst yapılarda dijital ikizler, işletim-bakım aşamasında da kolaylık sağlamaktadır.

Yapım sektöründe dijital ikizlerin zayıf yönleri şunlardır:

- **BIM'le eşdeğer tutulması:** Özellikle tasarım aşamasında dijital ikizler ile BIM modelinin eşdeğer tutuluyor olması anlayışı, dijital ikizlerin olanaklarının BIM ile sınırlı olduğu algısına yol açmaktadır.

- **Bakım-onarımda yalnızca geri bildirim sağlanması:** Sektörde tam dijitalleşme henüz sağlanmadığı için işletme-bakım aşamasında meydana gelen hasar ya da bakım-onarım ihtiyacı sisteme geri bildirim aşamasında kalmakta, geri bildirim sonucu onarım ya da hasar giderme yetkili personel tarafından yapılmaktadır.

- **Yüksek ilk yatırım maliyeti:** Sistemin karmaşıklığına bağlı olarak dijital ikiz oluşturmanın maliyeti değişkenlik gösterebilir. İlk yatırım maliyeti yüksek olan dijital ikizler, henüz sektörde yaygınlaşmaması sebebiyle yatırımcılar tarafından kolaylıkla kabul görmeyebilir.

- **İş birliği eksikliği:** Yapı yaşam döngüsü aşamalarında dijital ikizlerin kullanımı ile ilgili çalışmalarda farklı disiplinler arasındaki iş birliğinin eksik olduğu işaret edilmesi bütüncül bakış açısı önünde engel teşkil etmektedir.

- **İnsan kaynaklı hatalar:** Dijital ikiz oluştururken sistem kurulmasının ve veri girişinin insan eliyle olması sebebiyle insan kaynaklı hatalar meydana gelebilir. Sistem kurulumu ve veri girişi ne kadar dikkatli yapılırsa o kadar değerli bir dijital ikiz elde edileceği için insan kaynaklı meydana gelen hatalar da sistemin "kusursuzluğu"nun bozulmasına yol açabilir.

- **Şantiyede alan ihtiyacı:** Özellikle yapıım aşamasında üretim için kullanılacak olan dijital ikiz teknolojileri için şantiye alanında yeterli alana ihtiyaç duyulabilir.

Yapım sektöründe dijital ikizlerin fırsatları şunlardır:

- **Diğer sektörleri dönüştürme gücü:** Dijital ikizlerin yapıım sektöründe yaygın ve etkili kullanılması, sektörün birlikte çalıştığı pek çok sektörü de etkileyeceği için diğer sektörleri de dönüştürme gücüne sahiptir.

- **Atık yönetimi ve geri dönüşüme katkı:** Yıkım aşamasında da dijital ikizin kullanımının geliştirilmesi ile atık yönetimi ve geri dönüşüm konularına katkı sağlanabilir.

Yapım sektöründe dijital ikizlerin tehditleri şunlardır:

- **Veri güvenliği:** Sektörün giderek dijitalleşmesi ile veri güvenliği önem kazanmaktadır. Veri güvenliği konusunda yaşanabilecek aksaklıklar, sistemin tamamen işlevsiz hale gelmesine yol açabilir.

- **İstihdamda azalma:** Dijital ikizlerin yaygınlaşması ile yapı yaşam döngüsü süreçlerinde bazı aşamaların insandan bağımsız ilerlemesi istihdamda azalmaya yol açabilir.

Yapım sektöründe dijital ikiz uygulamalarının SWOT analizi bulguları Tablo 4'te özetlenmektedir.

Tablo 4. SWOT Analizi	
S (Güçlü Yönler)	Bütüncül bakış açısı Etkili süreç yönetimi Etkili paydaş katılımı Dijital ayak izi sağlama İşçilik maliyetlerinde düşüş Kalitede artış Enerji tüketimi takip-kontrol İşletme-bakımda kolaylık
W (Zayıf Yönler)	BIM'le eşdeğer tutulması Bakım-onarımda yalnızca geri bildirim sağlanması Yüksek ilk yatırım maliyeti İş birliği eksikliği İnsan kaynaklı hatalar Şantiyede alan ihtiyacı
O (Fırsatlar)	Diğer sektörleri dönüştürme gücü Atık yönetimi ve geri dönüşüme katkı
T (Tehditler)	Veri güvenliği İstihdamda azalma

Tartışma

Yapı yaşam döngüsü aşamalarında dijital ikiz kullanımının güçlü yönlerinin ilki dijital ikizin dinamik bir varlık olması ile tüm süreçlerde değişen koşullara eş zamanlı yanıtlar verilebilmesini sağlamaktır. Her aşamadaki seçeneklerden haberdar olunabilir ve optimum çözümler sağlanabilir. Tüm paydaşlar her aşamada şeffaf katılım sağlayabilir. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda dijital ikiz kullanımıyla yapı yaşam süreçlerinin her birinin başından sonuna kadar bütüncül bakış açısı sağlanabilir. Dijital ikizlerin bir diğer güçlü yönü veri tabanında saklanan bilgileri gelecekte üretilecek yapılar için bir veri kaynağı olarak saklaması, kaynak tüketimini takip ve kontrol edebilme imkanı sunması ile sürdürülebilirliğe katkıda bulunmasıdır. Yine kaynak tüketimine katkı sağlaması, kullanıldığı aşamalarda süreçlerin dijitalleşmesi ile insan kaynaklı hataların azalması ve üretimde kalitenin artması ile yapı üretiminde verimlilik artışı sağlaması da dijital ikizlerin güçlü yönlerindedir. Broo ve Schooling (2021), İngiltere’de sektördeki yöneticilerle yaptıkları görüşmeler sonucunda, dijital ikizlerin yapı sektörünün farklı aşamalarına katkılar koyacağı, yapı sektörü ürünlerinin daha hızlı, daha kaliteli, daha düşük maliyetle ve daha sürdürülebilir şekilde inşa edileceği fikrini ortaya koymuşlardır. Ayrıca Rao vd. (2022) yapı sektöründe verimliliğin artması için dijitalleşmenin benimsenmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Dijital ikizlerin zayıf yönleri ise özellikle tasarım aşamasında dijital ikizlerin BIM ile eşdeğer tutulması, yapı sektörünün henüz tam anlamıyla dijitalleşmemiş olması, bazı aşamalarda insan gücü ile devamlılık sağlanması ve tüm bunlara bağlı olarak dijital ikizlerin kusursuzluğunun sağlanamaması olarak belirtilebilir. Broo ve Schooling (2021) da çalışmada sektörde çalışan vasıflı insan eksikliğini dijital ikiz kullanımı konusundaki zorluklardan biri olarak ele almışlardır. Aynı şekilde Tan vd. (2022), mimari arkeoloji alanında yaptıkları çalışmada, paydaşların BIM konusunda yeterli bilgiye sahip olmamaları sebebiyle dijital ikizden yararlanabilmek için BIM konusunda tecrübeli sektör paydaşlarından destek almak gerektiğini belirtmişlerdir. Dijital ikizlerin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, yapı aşamasında kullanılacak olan teknolojik alt yapı için sahada belli bir alan gerektirmesi gibi sebeplerle sektörde kabul görmesinin zorlaşması da dijital ikizlerin zayıf yönlerindedir. Peng vd. (2020), yapı sektöründeki projelerde dijital ikiz uygulamalarının yatırım maliyetinden dolayı finansal

açından risk taşıdığını, hatta tasarım aşamasından itibaren dikkatli bir planlama yapılmadığı durumlarda sisteme sonradan çeşitli cihaz ve donanım eklemenin neredeyse imkânsız olduğunu belirtmişlerdir. Ammar vd. (2022) çalışmada dijital ikiz destekleyecek olan teknolojilerin geliştirilmesi gerektiğinden ve bu teknolojilerin yapı yaşam döngüsü aşamalarının başında dahil edilmesi gerektiğinden bahsetmiştir. Wei vd. (2022), mevcut teknolojik koşullardan dolayı dijital ikizde tamamen otomatik bir sistem kurulamadığını, veri aktarımının halen manuel şekilde yani insan aracılığıyla yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Manuel veri girişi olmasından dolayı eşzamanlı ilerleme süreci sağlanamadığını, buna bağlı olarak karar verme süreçlerini etkilediğini ifade etmişlerdir. Chacón vd. (2024), veri toplama konusunda erişilmesi zor arazi konumları, vasıfsız çalışanların teknolojiye erişimindeki zorluklar, teknoloji kullanımındaki zorluğa bağlı olarak ortaya çıkabilecek veri güvenliği ve gizliliğindeki zafiyet gibi dijital ikizle ilgili geliştirilmesi gereken alanlar olduğunu belirtmişlerdir.

Peng vd.(2020), yatırımcıların öngörülü şekilde hareket etmeleri durumunda dijital ikiz kavramının yapı sektöründeki projelerde sağladığı yararlar görüldüğü süreçte yatırımcıların da dijital ikizleri daha tereddütsüz kabullenerek kullanacağını öngörmüşlerdir. Ayrıca Sepasgozar (2021) çalışmada dijital ikiz kavramının yapı sektöründeki literatür araştırmalarının henüz başlangıç aşamasında olduğunu, kavramın sektörde kabul görmesini beklemeden önce henüz araştırılmamış olan konuların araştırılması ve literatürdeki mevcut boşlukların ele alınması gerektiğini belirtmiştir. Qian vd. (2024), mevcut teknolojilerin dijital ikiz sistem kurulumuna ve kullanımına olanak sağladığı, dijital ikiz teknolojilerinin gelişmesi ile daha doğru ve eşzamanlı bilgi alınabileceğini belirtmişlerdir. Literatürdeki araştırmalar arttıkça, dijital ikiz kavramının zayıf yönlerinin giderilip güçlü yönlere evrileceği öngörülmektedir.

Sektörün giderek dijitalleşmesi ile dijital ikizlerin eksikliklerinin giderilerek sistemin geliştirilmesi, dijital ikiz uygulamalarının sektörde daha kolay kabul görmesi ve kullanımının yaygınlaşması mümkündür. Böylelikle gelecekte sektörde ulusal ve uluslararası alanda yeni iş birliklerinin sağlanmasına da imkan tanınabilir. Yapım sektörünün her geçen gün teknolojik olarak gelişmesiyle dijital ikizlerin zayıf yönlerinin de paralel olarak geliştirilerek güçlü yöne dönüşmesi sağlanabilir.

Dijital ikizlerin yapı sektöründe her geçen gün geliştirilmesi, dijital ikiz kavramının fırsatlarını-bir anlamda potansiyelini- de içinde barındırır. Yapım sektöründeki teknolojik gelişmelere paralel olarak, pek çok sektör ile multidisipliner ilişki içinde olan yapı sektörünün diğer sektörleri de olumlu yönde etkileyeceği ve ilişki içinde olduğu sektörlerin de dijitalleşme sürecine katkı sağlayacağı, böylece sektörler arası bütüncül bakış açısı sağlanabileceği öngörülmektedir. Opoku vd. (2021) dijital ikiz teknolojisinin yapı sektörünün dönüşürme potansiyeli olduğunu ancak bunun için sektörün de bu dönüşüme açık olması gerektiğini belirtmiştir. Ancak bu şekilde yapı sektörünün diğer sektörlerle daha kolay entegre şekilde çalışabileceğini vurgulamıştır.

Yapı yaşam döngüsünün son aşaması olan yıkım aşamasını kapsayan yalnızca 1 çalışmaya erişilmiş olmasına rağmen, sektörün dijitalleşmesine paralel olarak atık yönetimi, geri dönüşüm gibi yıkım aşamasındaki süreçlerde de dijital ikizlerden yararlanma fırsatından oluşması beraberinde yapı yaşam döngüsü aşamalarının tamamında dijital ikizlerden yararlanmayı ve yapı yaşam döngüsü yönetiminde dijital ikizlerden bütüncül bakış açısı elde etmeyi sağlayabilir.

Tüm bu güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatların yanı sıra dijital ikizlerin yapım sektöründe kullanılmasıyla ilgili bazı önlemlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Özellikle her bilginin dijital ortama aktarılması ve süreçlerin dijital ortamda yürütülmesi siber güvenlik kavramının önemini ortaya koymaktadır. Alshammari vd. (2021), nesnelerin internetinin geliştirilmesi ile ilgili ortaya koydukları çalışmada, dijital ikiz kavramının gelişiminin önündeki en büyük engellerden biri olarak siber güvenlik konusunu belirtmişlerdir. Bu sebeple, mevcut dijital ikiz uygulamaları karşılaştırılarak risklerin tespit edilmesini, kamu politikaları ile bu risklerin karşılaştırılmasını ve siber güvenlik konusunda çalışan endüstrilerle iş birliği içinde ilerlemeyi önermişlerdir. Ayrıca sektörün dijitalleşmesi her ne kadar “kusursuz ürün”e ve “kusursuz süreç”lere giderek yaklaşmayı mümkün kılıyor gibi görünse de sektörde insan gücünün azalması istihdamda azalmaya yol açabileceği öngörülmektedir. Madubuike vd. (2022) de çalışmasında, özellikle saha çalışanlarının işlerini kaybetme endişesinin dijital ikizlerin sektörde kabul görmesi konusunda engel teşkil edebileceğini belirtmiştir.

Sonuç

Yapım sektöründe yapı yaşam döngüsü kapsamında dijital ikiz teknolojisini ele alan bu çalışmada dijital ikiz kavramının sektördeki durumu incelenmiştir. Akademik veritabanlarında anahtar kelime grubu olarak “Digital Twin” AND “Building Lifecycle”, “Digital Twin” AND “Construction Industry” ve “Digital Twin” AND “Case Study” kelime grupları seçilmiştir. Çıkan sonuçlardan vaka analizi yapan 21 tane makaleye erişilmiştir. Vaka analizi yapan çalışmaların yapı yaşam döngüsünün hangi noktasını ele aldığı ve dijital ikizi nasıl oluşturduğu incelenmiştir. Bu incelemeye göre vaka analizi yapan makalelerin daha çok işletme-bakım aşamasını ele aldığı gözlenmiştir. Dijital ikiz oluşturmak için ise en yaygın olarak lazer tarama ve nesnelerin interneti teknolojilerinden yararlandığı, BIM’in ise dijital model oluşturma aşamasında sanal model oluşturmada katkısının olduğu gözlenmiştir.

Çalışma kapsamında incelenen 21 makaleden yola çıkılarak yapılan SWOT analizi sonucu yapım sektöründe yapı yaşam döngüsü bağlamında dijital ikiz kavramının güçlü yönleri, bütüncül bakış açısı, etkili süreç yönetimi, etkili paydaş katılımı, dijital ayakizi sağlama, işçilik maliyetlerinde düşüş, kalitede artış, enerji tüketimi takip-kontrol ve işletme-bakım aşamasında kolaylık gibi konular olarak ortaya konmuştur. Öte yandan dijital ikizin zayıf yönleri ise, BIM modeli ile eşdeğer tutuluyor olması, bakım-onarımda sistemin katkısının yalnızca geri bildirimle sınırlı kalması, ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, iş birliği eksikliği, insan kaynaklı hatalar, şantiyede alan ihtiyacı gibi konularda halen eksikliğinin bulunması olarak ifade edilmiştir. Gelecekte dijital ikizin yapım sektöründe kullanımının geliştirilmesi ve yaygınlaşması sonucu diğer sektörleri de dönüştürme gücü olduğu ve yıkım aşamasında atık yönetimi ve geri dönüşüm aşamalarına katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Bu öngörü, dijital ikizin yapım sektörü için barındırdığı fırsatları ifade etmektedir. Dijitalleşmenin artması ile birlikte veri güvenliği kavramı ve istihdamda azalma riskleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Veri güvenliği ve istihdamda azalma ihtimali ise dijital ikizin karşı karşıya bulunduğu tehditler olarak belirtilmiştir.

Pek çok sektörde olduğu gibi teknolojik gelişmelere paralel olarak dijital ikiz teknolojileri, yapım sektöründe kullanımı mevcut gelişim aşamasında her ne kadar sınırlı kalsa da, dijital ikizlerin barındırdığı potansiyelin gelecekte ortaya çıkacağı öngörülmektedir. Bütüncül bakış açısı, sürdürülebilirliğe katkı,

verimlilik artışı gibi güçlü yönler ve sektörde artan dijitalleşme ile birlikte yapım sektörünün birlikte çalıştığı farklı sektörleri de dönüştürme gücü ile gelecekte atık yönetimi, geri dönüşüm aşamalarına katkı koymasının öngörülmesi gibi fırsatlar dijital ikizin yapım sektöründe potansiyelini ortaya koymaktadır. Tüm bunların yanı sıra dijital dönüşümün tamamlanmamış olması nedeniyle dijital ikizlerin kusursuzluğunun sağlanamaması ve farklı sebeplerden dolayı sektörde kabul görmesinin zorluğu gibi zayıf yönleri ve siber güvenlik konusundaki eksiklikler ile dijital dönüşümün sonucu olarak istihdamın azalması gibi önlem alınması gereken tehdit unsurları da göz önünde bulundurulmuş, ilerleyen süreçte yapım sektörüne daha çok fayda sağlayacağı ve sektörü güçlendireceği öngörülmektedir.

Çalışma sonuçlarının yapım sektöründeki uygulayıcı paydaşlar için bir ön izleme sağlaması, dijital ikizlerden hangi yapı yaşam döngüsü süreçlerinde nasıl yararlandığıyla ilgili olarak örnek teşkil etmesi, bilim alanı açısından da gelecekte yapılacak olan çalışmalar için altlık oluşturması, geliştirilmesi gereken teknolojilerin belirlenmesine katkıda bulunması hedeflenmektedir. Çalışmada yapılan değerlendirmeler literatür analizi ile sınırlı olup, gelecekte yapım sektörü paydaşlarının görüşlerini ele alan çalışmaların yapılmasının dijital ikiz teknolojilerinin yapım sektörüne daha hızlı adapte edilmesine önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Hakem Değerlendirmesi: Dış bağımsız.

Yazar Katkıları: Konsept - C.B., İ.E.; Tasarım - C.B.; Denetim - İ.E.; Kaynaklar - C.B.; Malzemeler - C.B.; Veri Toplama ve/veya İşleme - C.B.; Analiz ve/veya Yorum - C.B.; Literatür Taraması - C.B.; Yazma - C.B.; Eleştirel İnceleme - İ.E.

Etik Kurul Onay Belgesi: Yazarlar, etik kurul onay belgesine gerek olmadığını beyan etmiştir.

Çıkar Çatışması: Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan etmiştir.

Finansal Destek: Yazarlar, bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir.

Peer-review: Externally peer-reviewed.

Author Contributions: Concept - C.B., İ.E.; Design - C.B.; Supervision - İ.E.; Resources - C.B.; Materials - C.B.; Data Collection and/or Processing - C.B.; Analysis and/or Interpretation - C.B.; Literature Search - C.B.; Writing Manuscript - C.B.; Critical Review - İ.E.

Ethics Committee Approval Certificate: The authors declared that an ethics committee approval certificate is not required.

Conflict of Interest: The authors have no conflicts of interest to declare.

Financial Disclosure: The authors declared that this study has received no financial support.

Kaynaklar

- Agarwal, R., Chandrasekaran, S., & Sridhar, M. 2016. *Imagining Construction's Digital Future*. McKinsey & Company. 24(06)
- Agyekum, E. B., Amjad, F., Mohsin, M., & Ansah, M. N. S. (2021). A bird's eye view of Ghana's renewable energy sector environment: a Multi-Criteria Decision-Making approach. *Utilities Policy*, 70, 101219. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101219>
- Akanmu, A. A., Anumba, C. J., & Ogunseju, O. O. 2021. Towards Next Generation Cyber-Physical Systems and Digital Twins for Construction. *Journal of Information Technology in Construction (ITCon)*, 26(27), 505-525. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.027>

- Aktan, C. C. 1999. *2000'li Yıllarda Yeni Yönetim Teknikleri 2 (Stratejik Yönetim)*. Simge Ofis Matbaacılık.
- Alonso, R., Locci, R., & Recuperero, D. R. 2024. Improving digital twin experience through big data, IoT and social analysis: An architecture and a case study. *Heliyon*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24741>
- Alshammari, K., Beach, T., & Rezgui, Y. 2021. Cybersecurity for Digital Twins in the Built Environment: Current Research and Future Directions. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 159-173. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.010>
- Ammar, A., Nassereddine, H., Abdalbaky, N., Aboukansour, A., Tannoury, J., Urban, H., & Schranz, C. 2022. Digital Twins in the Construction Industry: A Perspective of Practitioners and Building Authority. *Frontiers in Built Environment*, 102. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.834671>
- Anderl, R., Haag, S., Schützer, K., & Zancul, E. 2018. Digital Twin Technology-An Approach for Industrie 4.0 Vertical and Horizontal Lifecycle Integration. *it-Information Technology*, 60(3), 125-132. <https://doi.org/10.1515/itit-2017-0038>
- Angjeliu, G., Coronelli, D., & Cardani, G. 2020. Development of the Simulation Model for Digital Twin Applications in Historical Masonry Buildings: The Integration Between Numerical and Experimental Reality. *Computers & Structures*, 238, 106282. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106282>
- Antwi-Afari, P., Ng, S. T., & Hossain, M. U. 2021. A Review of the Circularity Gap in the Construction Industry Through Scientometric Analysis. *Journal of cleaner production*, 298, 126870 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126870>
- Arslan, G., Kıvrak, S., & Şenel, H. G. 2019. İnşaat Projeleri Kalite Kontrolünde Nokta Bulut Gösteriminin Kullanımı ve Artırılmış Gerçeklik Teknolojisinin Uygulanması. TÜBİTAK projesi <https://doi.org/10.2339/politeknik.385916>
- Baghalzadeh Shishehgharkhaneh, M., Keivani, A., Moehler, R. C., Jelodari, N., & Roshdi Laleh, S. 2022. Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in Construction Industry: A Review, Bibliometric, and Network Analysis. *Buildings*, 12(10), 1503. <https://doi.org/10.3390/buildings12101503>
- Borth, M., Verriet, J., & Muller, G. 2019. Digital Twin Strategies for Sos 4 Challenges And 4 Architecture Setups for Digital Twins of Sos. In 2019 14th annual conference system of systems engineering (SoSE) (pp. 164-169). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SYSESE.2019.8753860>
- Broo, D. G., & Schooling, J. 2021. Digital Twins in Infrastructure: Definitions, Current Practices, Challenges and Strategies. *International Journal of Construction Management*, 1-10.
- Canedo, A. 2016. Industrial IoT Lifecycle via Digital Twins. In Proceedings of the Eleventh IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (pp. 1-1). <https://doi.org/10.1145/2968456.2974007>
- Ceylan, E. Z. 2019. Dijital İkizler ve İnşaat Sektöründeki Yeri. *Yapı Bilgi Modelleme*, 1(2), 53-61.
- Chacón, R., Posada, H., Ramonell, C., Jungmann, M., Hartmann, T., Khan, R., & Tomar, R. 2024. Digital twinning of building construction processes. Case study: A reinforced concrete cast-in structure. *Journal of Building Engineering*, 84, 108522. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108522>
- Chowdhury, T., Adafin, J., & Wilkinson, S. 2019. Review Of Digital Technologies To Improve Productivity of New Zealand Construction Industry. *Journal of Information Technology in Construction*, 24, 569-587. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2019.032>
- Coupry, C., Noblecourt, S., Richard, P., Baudry, D., & Bigaud, D. 2021. BIM-Based Digital Twin and XR Devices to Improve Maintenance Procedures in Smart Buildings: A Literature Review. *Applied Sciences*, 11(15), 6810. <https://doi.org/10.3390/app11156810>
- Delgado, J. M., Guimarães, A. S., Poças Martins, J., Parracho, D. F., Freitas, S. S., Lima, A. G., & Rodrigues, L. 2023. BIM and BEM Interoperability-Evaluation of a Case Study in Modular Wooden Housing. *Energies*, 16(4), 1579. <https://doi.org/10.3390/en16041579>
- Dubas, S., & Pastawski, J. 2017. The Concept of Improving Communication in BIM During Transfer to Operation Phase on The Polish Market. *Procedia engineering*, 208, 14-19. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.015>
- Gabor, T., Belzner, L., Kiermeier, M., Beck, M. T., & Neitz, A. 2016. A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems. In 2016 IEEE international conference on autonomic computing (ICAC) (pp. 374-379). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAC.2016.29>
- Geçim, G. 2018. Yapı Yaşam Döngüsünde Sürdürülebilir Yapı Değerlendirme Sistemlerinin Karşılaştırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Gürlek, B. T. 2002. *SWOT Analizi*. Gebze: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK).
- Harode, A., Thabet, W., & Dongre, P. 2023. A tool-based system architecture for a digital twin: a case study in a healthcare facility. *ITcon*, 28, 107-137. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2023.006>
- Hu, W., Lim, K.Y.H., Cai, Y. 2022. Digital Twin and Industry 4.0 Enablers in Building and Construction: A Survey. *Buildings*, 12 (11), 2004 <https://doi.org/10.3390/buildings12112004>
- Ilhan, B., & Yaman, H. 2016. Green Building Assessment Tool (GBAT) For Integrated BIM-Based Design Decisions. *Automation in Construction*, 70, 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.001>
- İçten, T., & Güngör, B. A. L. 2017. Artırılmış Gerçeklik Üzerine Son Gelişmelerin ve Uygulamaların İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(2), 111-136.
- Jiang, Y., Li, M., Li, M., Liu, X., Zhong, R. Y., Pan, W., & Huang, G. Q. 2022. Digital Twin-Enabled Real-Time Synchronization for Planning, Scheduling, and Execution in Precast On-Site Assembly. *Automation in Construction*, 141, 104397. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104397>
- Kaewunruen, S., & Lian, Q. 2019. Digital Twin Aided Sustainability-Based Lifecycle Management for Railway Turnout Systems. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1537-1551. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.156>
- Kaewunruen, S., Sresakoolchai, J., Ma, W., & Phil-Ebosie, O. 2021. Digital Twin Aided Vulnerability Assessment and Risk-Based Maintenance Planning of Bridge Infrastructures Exposed to Extreme Conditions. *Sustainability*, 13(4), 2051. <https://doi.org/10.3390/su13042051>
- Kang, K., Besklubova, S., Dai, Y., & Zhong, R. Y. 2022. Building demolition waste management through smart BIM: A case study in Hong Kong. *Waste Management*, 143, 69-83. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.027>
- Kumaş, E., & Erol, S. 2021. Endüstri 4.0'da Anahtar Teknoloji Olarak Dijital İkizler. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 691-701.
- Lennartsson, M., Yitmen, I., Movaffaghi, H., & Linderoth, H. 2020.

- Framework for Digital Development in Industrialized Housebuilding. In 9th Swedish Production Symposium (SPS2020), 7-8 October 2020, Jönköping, Sweden (Vol. 13, pp. 335-345). IOS Press.
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. 2021. Review of Digital Twin About Concepts, Technologies, And Industrial Applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- Lu, R., & Brilakis, I. 2019. Digital Twinning of Existing Reinforced Concrete Bridges from Labelled Point Clusters. *Automation in Construction*, 105, 102837. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102837>
- Madakam, S., Lake, V., Lake, V., & Lake, V. 2015. Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications*, 3(05), 164. <https://doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>
- Madni, A. M., Madni, C. C., & Lucero, S. D. 2019. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, 7(1), 7. <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
- Madubuike, O. C., Anumba, C. J., & Khallaf, R. 2022. A Review of Digital Twin Applications in Construction. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 27(8), 145-172. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.008>
- Momeni, M., Relefors, J., Khatry, A., Pettersson, L., Papadopoulos, A. V., & Nolte, T. 2022. Automated Fabrication Of Reinforcement Cages Using a Robotized Production Cell. *Automation in Construction*, 133, 103990. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103990>
- Ni, Z., Liu, Y., Karlsson, M., & Gong, S. 2022. Enabling preventive conservation of historic buildings through cloud-based digital twins: A case study in the city theatre, norrköping. *IEEE Access*, 10, 90924-90939. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3202181>
- Opoku, D. G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., & Rashidi, M. 2021. Digital Twin Application in the Construction Industry: A Literature Review. *Journal of Building Engineering*, 40 (2021), 102726. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102726>
- Opoku, D. G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., Rashidi, M., Bamdad, K., & Famakinwa, T. 2024. Digital twin for indoor condition monitoring in living labs: University library case study. *Automation in Construction*, 157, 105188. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105188>
- Peng, Y., Zhang, M., Yu, F., Xu, J., & Gao, S. 2020. Digital Twin Hospital Buildings: An Exemplary Case Study Through Continuous Lifecycle Integration. *Advances in Civil Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8846667>
- Porter, M. E., & Michael; ilustraciones Gibbs. (2001). *Strategy and the Internet*.
- Qi, Q., & Tao, F. 2018. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*, 6, 3585-3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Qian, Y., Leng, J., Zhou, K., & Liu, Y. 2024. How to measure and control indoor air quality based on intelligent digital twin platforms: A case study in China. *Building and Environment*, 253, 111349. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111349>
- Qiuchen Lu, V., Parlidak, 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. In *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC) Driving data-informed decision-making* (pp. 67-75). ICE Publishing. <https://doi.org/10.1680/icsic.64669.067>
- Rao, A. S., Radanovic, M., Liu, Y., Hu, S., Fang, Y., Khoshelham, K., Palaniswami, M. & Ngo, T. 2022. Real-Time Monitoring of Construction Sites: Sensors, Methods, and Applications. *Automation in Construction*, 136, 104099. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104099>
- Rokooei, S. 2015. Building Information Modeling in Project Management: Necessities, Challenges and Outcomes. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 210, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.332>
- Romanovich, M., Kuzmenkova, M., Breskich, V., & Kulakov, K. 2021. Using the Laser Scanning Method in the Reconstruction of Metro Stations. *Transportation Research Procedia*, 54, 819-826. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.135>
- Sandberg, A. B., Klementsens, E., Muller, G., De Andres, A., & Maillet, J. (2016). Critical factors influencing viability of wave energy converters in off-grid luxury resorts and small utilities. *Sustainability*, 8(12), 1274. <https://doi.org/10.3390/su8121274>
- Schluse, M., & Rossmann, J. 2016. From Simulation to Experimentable Digital Twins: Simulation-Based Development and Operation of Complex Technical Systems. In *2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)* (pp. 1-6). *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/SysEng.2016.7753162>
- Sepasgozar, S. M. 2021. Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment. *Buildings*, 11(4), 151. <https://doi.org/10.3390/buildings11040151>
- Shim, C. S., Dang, N. S., Lon, S., & Jeon, C. H. 2019. Development of a Bridge Maintenance System for Prestressed Concrete Bridges Using 3D Digital Twin Model. *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(10), 1319-1332. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1620789>
- Sivori, D., Ierimonti, L., Venanzi, I., Ubertini, F., & Cattari, S. 2023. An equivalent frame digital twin for the seismic monitoring of historic structures: a case study on the Consoli palace in Gubbio, Italy. *Buildings*, 13(7), 1840. <https://doi.org/10.3390/buildings13071840>
- Tan, J., Leng, J., Zeng, X., Feng, D., & Yu, P. 2022. Digital twin for Xiegong's architectural archaeological research: A case study of Xuanluo Hall, Sichuan, China. *Buildings*, 12(7), 1053. <https://doi.org/10.3390/buildings12071053>
- Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S. C.-Yu. & Nee, A. Y. 2019. Digital Twin-Driven Product Design Framework. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3935-3953. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443229>
- Teicholz, P. (Ed.). 2013. *BIM for Facility Managers*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119572633>
- Tran, H., Nguyen, T. N., Christopher, P., Bui, D. K., Khoshelham, K., & Ngo, T. D. 2021. A Digital Twin Approach for Geometric Quality Assessment of As-Built Prefabricated Façades. *Journal of Building Engineering*, 41, 102377. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102377>
- Wang, H., Qian, Y., Kuang, Y., Leng, J., Yang, Y., & Zhang, H. 2024. How occupant positioning systems can be applied to help historic residences manage energy consumption: A case study in China. *Building and Environment*, 249, 111110. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111110>
- Wei, Y., Lei, Z., & Altaf, S. 2022. An off-site construction digital twin assessment framework using wood panelized construction as a case study. *Buildings*, 12(5), 566.

<https://doi.org/10.3390/buildings12050566>

Xie, H., Xin, M., Lu, C., & Xu, J. 2022. Knowledge Map and Forecast of Digital Twin in the Construction Industry: State-of-the-Art Review Using Scientometric Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 135231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135231>

Zhao, L., Zhang, H., Wang, Q., & Wang, H. 2021. Digital-Twin-Based Evaluation of Nearly Zero-Energy Building for Existing Buildings Based on Scan-to-BIM. *Advances in Civil Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6638897>