

Received-Makale Geliş Tarihi 21.02.2025
Published-Yayınlanma Tarihi 30.04.2025
Volume-Cilt (Issue-Sayı), ss/pp 12 (118), 795-810

Research Article /Araştırma Makalesi
10.5281/zenodo.15018000

Arş. Gör. Dr. Derya Demircan

<https://orcid.org/0000-0001-8166-6725>

Balıkesir Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Balıkesir / TÜRKİYE
ROR Id: <https://ror.org/02tv7db43>

Doç. Dr. Serkan Palabıyık

<https://orcid.org/0000-0002-7949-7130>

Balıkesir Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Balıkesir / TÜRKİYE
ROR Id: <https://ror.org/02tv7db43>

Dijital İkiz Teknolojilerinin Eğitime Adaptasyonu, Potansiyelleri ve Sınırlılıkları

Integration of Digital Twin Technologies into Education, Potentials and Limitations

ÖZET

Dijital İkiz (DT) teknolojileri, gelişmiş veri entegrasyonu ve analitiği yoluyla dijital dönüşümü kolaylaştıran, yapılı çevre endüstrisinde çok önemli bir yeniliktir. DT'ler, yaşam döngüsü enerji kullanımını optimize etme, operasyonel verimliliği artırma, öngörücü bakımı etkinleştirme ve kullanıcı uyumunu iyileştirme dahil olmak üzere bina tasarımı, inşaatı ve varlık yönetiminde önemli faydalar göstermiştir. Bu çalışma mimarlık, mühendislik ve inşaat (AEC) endüstrilerindeki DT tanımları, uygulamaları, potansiyelleri ve sınırlılıklarının kapsamlı bir incelemesine ve mimari tasarım eğitiminin dönüşümü kapsamında DT'lerin eğitim alanında sunduğu potansiyellerin ve sınırlılıkların araştırılmasına odaklanmaktadır. Araştırma 2 aşamadan oluşan sistematik bir literatür analizini içerir. Örneklem alan olarak Web of Science belirlenmiş ve elde edilen veriler VOSviewer 1.6.20 yazılımı ile analiz edilerek görselleştirilmiştir. Birinci aşamada AEC endüstrisinde DT'nin uygulanmasına ilişkin toplam 3788 makaleyi, ikinci aşamada eğitim alanında DT'nin uygulanmasına ilişkin 776 makaleyi incelemek için Sistematik Literatür İncelemesi (SLR) yaklaşımı kullanılmıştır. DT'nin uygulamaları eğitim ve AEC endüstrileri özelinde karşılaştırıldığında, eğitim ile ilgili DT araştırmalarının sayısının oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda eğitimin dönüşümü kapsamında DT teknolojilerinin bu sürece adaptasyonu oldukça önemli görülmektedir. Sonuç olarak dijital ikiz teknolojisinin eğitim müfredatına dahil edilmesinin simülasyon odaklı ürün geliştirme metodolojileri ile uygulamalı öğrenme yaklaşımını teşvik edeceği ve disiplinler arası iş birliğini iyileştireceği düşünülmektedir. Ayrıca gerçekçi çevresel simülasyonlar sunarak, karar vermeyi iyileştireceği ve problem çözme becerilerini geliştireceği öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dijital ikiz teknolojileri, AEC endüstrisi, mimari tasarım eğitimi, bibliyometrik analiz.

ABSTRACT

Digital Twin (DT) technologies are a crucial innovation in the built environment industry, facilitating digital transformation through advanced data integration and analytics. DTs have demonstrated significant benefits in building design, construction, and asset management, including optimizing life-cycle energy use, increasing operational efficiency, enabling predictive maintenance, and improving occupant compliance. This study focuses on a comprehensive review of DT definitions, applications, potentials and limitations in the architecture, engineering and construction (AEC) industries and an exploration of the potentials and limitations that DTs offer in the field of education in the context of the transformation of architectural design education. The research involves a systematic literature analysis consisting of 2 stages. Web of Science was selected as the sample area and the data obtained were analyzed and visualized with VOSviewer 1.6.20 software. A Systematic Literature Review (SLR) approach was used to examine a total of 3788 articles on the application of DT in the AEC industry in the first stage and 776 articles on the application of DT in the field of education in the second stage. When the applications of DT are compared between education and AEC industries, it is found that the number of DT research on education is quite low. In this context, the adaptation of DT technologies to this process within the scope of the transformation of education is considered very important. As a result, it is thought that the inclusion of digital twin technology in the education curriculum will encourage a hands-on learning approach with simulation-oriented product development methodologies and improve interdisciplinary collaboration. It is also envisioned to improve decision making and problem solving skills by providing realistic environmental simulations.

Keywords: Digital twin, AEC industry, architectural education, bibliometric analysis.

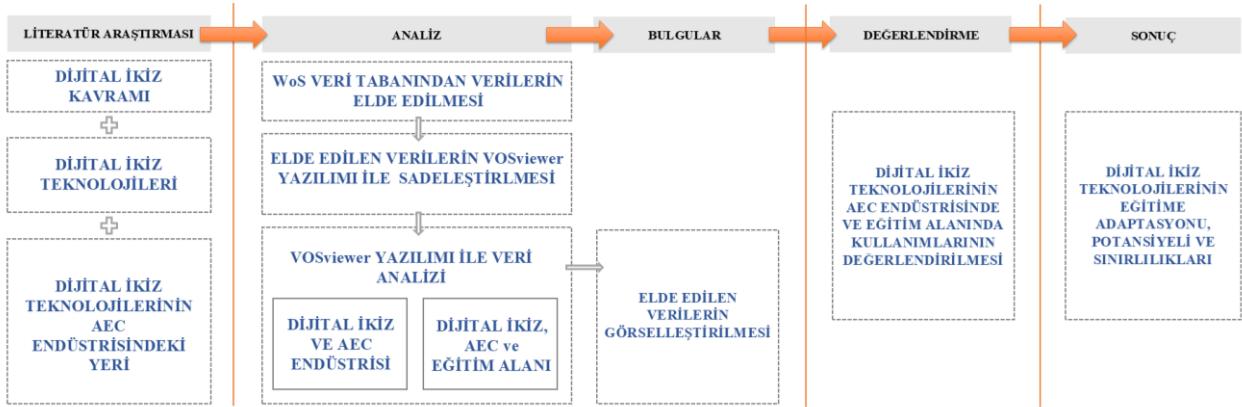
1. GİRİŞ

Son birkaç on yılda, Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ (AI), bulut bilişim ve büyük veri analitiği gibi en yeni nesil bilgi teknolojilerinin (Qi vd, 2019) ortaya çıkışı, çeşitli sektörlerde farklı sistemlerin ve süreçlerin dijitalleştirilmesini hızlandırmıştır. Bu süreçte Dijital İkiz (DT) teknolojisi, gelişmiş veri entegrasyonu ve analitiği yoluyla dijital dönüşümü kolaylaştıran, yapılı çevre endüstrisinde çok önemli bir yenilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Dijital ikiz (DT), süreçleri optimize etmek ve sonuçları tahmin etmek için gerçek zamanlı verileri ve simülasyonu birleştiren fiziksel bir sistemin sanal bir temsidir (Grieves & Vickers, 2017). Başlangıçta endüstriyel uygulamalar için geliştirilen DT teknolojisi, mühendislik, sağlık hizmetleri ve şehir planlama gibi alanlarda yaygın olarak benimsenmiştir. Eğitimde ise dijital ikizler, öğrencilerin sanal bir alanda gerçek dünya uygulamalarını keşfetmelerini ve bunlarla etkileşime girmelerini sağlayarak etkileşimli öğrenme için yenilikçi bir araç sunmaktadır (Tao ve diğerleri, 2018).

Dünyanın dijital dönüşüm olarak adlandırılan şeyi deneyimlediği bu süreçte, mimarlık pratiği ve eğitimi de insan yaratıcılığını en yeni hesaplama araçlarıyla harmanlayarak dönüştürmektedir. Bu dönüşüm özellikle, yapay zeka, otomasyon ve veri odaklı tasarımın verimliliği, inovasyonu ve problem çözmeyi geliştirdiği ve yapılı çevrenin geleceğini şekillendirdiği bir ortamda gerçekleşmektedir. Bu bağlamda, mimarlık pratiğinin öğretilme şekli, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ve Dijital İkizler (DT) gibi işbirlikçi çalışma metodolojileri ile desteklenen dijital dönüşüm ile yakından uyumlu olmayı gerektirir (De Los Santos Melo ve Beriguete Alcántara, 2024).

Bu makale, Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat (AEC) endüstrilerindeki DT tanımları, uygulamaları, potansiyelleri ve zorluklarının kapsamlı bir incelemesini sunar. Ayrıca araştırmacılar ve profesyoneller için önemli bilgiler sağlayarak DT hakkında daha kapsamlı ve ayrıntılı bir bakış açısı kazanmalarına yardımcı olur. Mimari tasarım eğitiminin dönüşümü kapsamında ise DT'lerin eğitim alanı üzerinde sahip olabileceği önemli etkiyi verimli kılmak amacıyla hangi araç ve platformlardan yararlanılabileceğini önerir.

DT'nin mimarlık pratiği ve eğitimindeki uygulamalarına dair kuramsal bir çerçevenin araştırılmasına odaklanılan bu çalışmada, bilimsel sistematik literatür analiz tekniklerinden yararlanılmıştır. Dört bölümde ele alınan çalışmanın ikinci bölümünde Dijital İkiz kavramının akademik ve teorik tanımı tartışılmış ve DT teknolojilerinin AEC sektöründeki kullanımları belirtilmiştir. Spesifik metodolojiler, adımlar ve bulgular Bölüm 3'te detaylandırılmıştır. Bölüm 4'te bulgulara ait analitik sonuçlar kapsamlı bir şekilde tartışılmış ve çalışmanın sonucu sunulmuştur.



Şekil 1. Çalışmanın organizasyonu.

2. DİJİTAL İKİZE GENEL BİR BAKIŞ

2.1. Dijital İkiz

DT yeni bir kavram olmamakla birlikte, 3B modelleme, sistem simülasyonu, dijital prototipleme gibi bazı mevcut teknolojilere (Boschert ve Rosen, 2016) dayanmaktadır. DT'nin artan popüleritesi, sanal dünyanın ve fiziksel dünyanın giderek daha fazla birbirine bağlanması ve bir bütün olarak bütünleşmesi yönündeki kaçınılmaz eğilimi yansıtmaktadır. Michael Grieves ilk olarak "fiziksel bir ürüne eşdeğer sanal bir dijital temsil" fikrini önermiştir (Grieves, 2005; Wu vd., 2022). 2003 yılında ortaya çıkmasına rağmen DT'nin geliştirilmesi ve kullanılması, NASA tarafından uzay aracı ve uydular gibi karmaşık sistemleri simüle etmek ve modellemek için başlatılmıştır. DT teknolojisi resmi olarak 2011 yılında havacılık endüstrisinde ortaya çıkmış ve 2012 yılı itibarıyla imalat endüstrisinde genişlemeye başlamıştır (De Los Santos Melo ve Beriguete Alcántara, 2024). Veri depolamanın dijitalleştirilmesi ve sensörlerin endüstriyel alanlara entegre

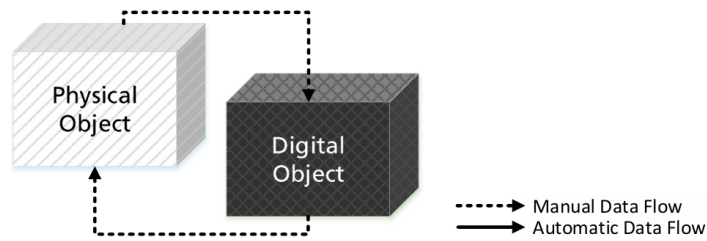
edilmesi olan Endüstri 4.0 sayesinde DT uygulamaları uygulanabilir hale gelmiştir. Özellikle, kapsamlı simülasyon yeteneklerinin ortaya çıkması ve hesaplama kaynaklarındaki önemli artış, sanal bir ortamda gerçekçi testler yapmayı mümkün hale getirmiştir. Bu teknik gelişmeler sayesinde Siemens, IBM ve GE gibi şirketler hem kendi iç operasyonları hem de müşterileri için bir hizmet olarak işlevsel DT'yi uygulamaya başlamıştır (Sharma vd., 2022). Son zamanlarda, bilgi ve iletişim teknolojilerinin hızla gelişmesiyle birlikte DT, ürün yaşam döngüsü yönetimi ile birlikte tasarım, üretim ve bakım aşamaları başta olmak üzere, sektörlerki birçok disiplinde (örneğin akıllı üretim, akıllı şehir vb.) geniş çapta ilgilenir ve benimsenir olmuştur (Wu vd., 2022).

Dijital ikiz modelinin kavramsal tanımları ele alındığında, 2014 yılında Grieves, temel DT modelinin üç ana bölümden oluştuğunu belirten DT hakkında teknik doküman yayınlamıştır: (a) Gerçek Uzaydaki fiziksel ürünler, (b) Sanal Uzaydaki sanal ürünler ve (c) sanal ve gerçek ürünleri birbirine bağlayan veri ve bilgi bağlantıları (Qi vd., 2019). Özünde DT, varlık davranışlarını simüle etmek, devam eden durumu izlemek, iç ve dış karmaşıklıkları tanımak, anormal kalıpları tespit etmek, sistem performansını yansıtmak ve gelecekteki eğilimi tahmin etmek için dijital biçimde fiziksel bir varlık için sanal bir model oluşturmayı içerir (Qi ve Tao, 2018). Grieves tarafından tanımlanan üç boyutlu DT modeli en çok uygulanan modeldir. Ancak, uygulama gereksinimlerinin sürekli genişlemesi ve yükseltilmesiyle, DT'nin geliştirilmesi ve uygulamaları yeni eğilimler ve talepler sunmaktadır. Uygulama alanlarının genişlemesiyle birlikte DT, farklı alanlardan, farklı kullanıcı seviyelerinden ve farklı işletmelerden daha fazla hizmet talebiyle karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle Tao ve diğerleri, Grieves tarafından önerilen DT modeline dayanarak, DT'nin daha fazla alanda daha fazla uygulamasını teşvik etmek için beş boyutlu DT modeli önermiştir (Qi vd., 2019).

Çalışma kapsamında Grieves tarafından tanımlanan ve en çok uygulanan üç boyutlu DT modeli aşağıda kısaca açıklanmıştır;

- Dijital Model

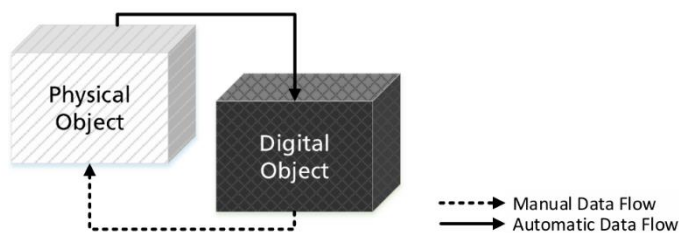
Dijital Model, fiziksel nesne ile dijital nesne arasında herhangi bir otomatik veri alışverişi kullanmayan mevcut veya planlanan bir fiziksel nesnenin dijital bir temsilidir (Tao vd., 2018; Qi vd., 2019). Dijital temsil, fiziksel nesnenin az ya da çok kapsamlı bir tanımını içerebilir. Bu modeller, planlanan yapıların simülasyon modellerini, yeni ürünlerin matematiksel modellerini veya herhangi bir otomatik veri entegrasyonu biçimi kullanmayan diğer fiziksel nesne modellerini içerebilir. Fiziksel nesnenin durumundaki bir değişikliğin dijital nesne üzerinde doğrudan bir etkisi yoktur ve bunun tersi de geçerlidir (Kritzinger vd., 2018; Liljaniemi ve Paavilainen, 2020).



Şekil 2. Dijital modelde veri akışı (Kritzinger vd., 2018).

- Dijital Gölge

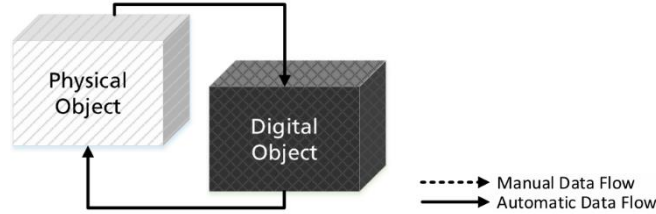
Bir dijital model tanımına dayanarak, mevcut bir fiziksel nesnenin durumu ile dijital bir nesnenin durumu arasında otomatik tek yönlü bir veri akışı varsa, Dijital Gölge gibi bir kombinasyona atıfta bulunulabilir. Fiziksel nesnenin durumundaki bir değişiklik, dijital nesnede bir durum değişikliğine yol açar, ancak bunun tersi geçerli değildir (Kritzinger vd., 2018; Liljaniemi ve Paavilainen, 2020).



Şekil 3. Dijital gölgede veri akışı (Kritzinger vd., 2018).

- Dijital İkiz

DT, fiziksel nesnenin organik bir bütünü ve bunun sayısallaştırılmış temsili anlamına gelir ve bunlar karşılıklı olarak iki yönlü etkileşimler yoluyla birbirleriyle iletişim kurar ve birlikte evrim geçirir (Tao vd., 2018). Çeşitli sayısallaştırma teknolojileri aracılığıyla, fiziksel dünyadaki nesnelere, davranışlar ve ilişkiler, yüksek doğrulukta sanal modeller oluşturmak için bütünsel olarak sayısallaştırılır (Tuegel vd., 2011; Qi vd., 2019). Böyle bir kombinasyonda, dijital nesne aynı zamanda fiziksel nesnenin kontrol edici örneği olarak da hareket edebilir. Fiziksel nesnenin durumundaki bir değişiklik, doğrudan dijital nesnenin durumunda bir değişikliğe yol açar ve bunun tersi de geçerlidir (Kritzinger vd., 2018; Liljaniemi ve Paavilainen, 2020).



Şekil 4. Dijital ikizde veri akışı (Kritzinger vd., 2018).

2.2. Dijital İkiz Teknolojisinin Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat Sektörlerindeki Yeri

Günümüzde özellikle makinelerin veya sistemlerin sanal kopyaları olan dijital ikiz, endüstriyi devrim niteliğinde değiştirmektedir (Tao ve Qi, 2019). Birçok sektör, sorunları tespit etmek ve verimliliği artırmak için halihazırda dijital ikizi kullanmaktadır (Tao vd., 2019). Bilgi teknolojilerinin ilerlemesiyle, özellikle nesnelere interneti (IoT), bulut bilişim, büyük veri analitiği ve yapay zekâ (AI) gibi yeni nesil bilgi teknolojilerinin (BT) ortaya çıkmasıyla, dijitalleşme süreci büyük ölçüde hızlanmıştır. Fiziksel ve sanal dünyaların bir araya gelmesiyle, dijitalleşme tüm sektörlerde olduğu gibi AEC endüstrisinde de inovasyonun ana itici güçlerinden biri haline gelmiştir (Botkina vd., 2018; Tao ve Qi, 2019).

DT'ler, dijital dönüşümü kolaylaştırarak AEC sektöründe önemli bir rol oynar. Gerçek zamanlı veri entegrasyonu ve simülasyonu sayesinde DT'ler daha sürdürülebilir bina yönetimi uygulamalarına olanak tanır, yaşam döngüsü maliyetlerini düşürür ve kullanıcı uyumunu iyileştirir (Mousavi vd., 2024). DT'lerin bu sektördeki en önemli avantajlarından biri, kritik hale gelmeden önce potansiyel sorunları belirlemeye yardımcı olan, kesinti süresini en aza indiren ve bakım masraflarını azaltan öngörücü bir yaklaşıma sahip olmasıdır (Gharineiat vd., 2024).

Ayrıca DT'ler altyapı izleme, trafik optimizasyonu ve çevresel etki değerlendirmelerine yardımcı olur. Daha dayanıklı ve uyarlanabilir kentsel ortamlar yaratmak için coğrafi verileri ve gelişmiş analitiği entegre ederek akıllı şehir girişimlerini destekler (Karimi vd., 2024).

Eğitim amaçlı olarak, dijital ikiz teknolojileri ise, gerçekçi çevresel simülasyonlar ve proje tabanlı öğrenme fırsatları sağlayarak, karar vermeyi iyileştirerek ve problem çözme becerilerini geliştirerek mimarlık, mühendislik ve inşaat yönetimi alanlarında uygulamalı eğitimi kolaylaştırır.

3. SİSTEMATİK LİTERATÜR İNCELEMESİ ve BULGULAR

Literatürde yer verilen tanımlamalarda, dijital ikizin farklı disiplinler arasında çeşitli şekillerde uygulanan ve sıklıkla kullanılan bir terim olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda, Negri vd. (2017) Dijital İkiz'in Endüstri 4.0 içindeki rolü, Khajavi vd. (2019) bina yaşam döngüsü yönetiminde dijital ikiz uygulaması, Francisco vd. (2020) gerçek zamanlı akıllı sayaç verilerini kullanarak enerji yönetimi özelinde akıllı bir şehir için dijital ikiz oluşturulması, Lu vd. (2020) HVAC sistemi üzerine bir vaka çalışması ile, yapıları işletme ve bakım aşamasında izlemek için dijital ikiz uygulaması, White vd. (2021) kentsel karar alma için IoT verilerini ve 3B mekansal bilgileri entegre ederek Docklands bölgesinin dijital ikiz modelinin oluşturulması ve Li vd. (2022), akıllı şehirlerde IoT veri analizini geliştirmek için derin öğrenmenin dijital ikizlerle entegre edilmesi gibi birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışma ise, mimari tasarım eğitiminin dönüşümünde dijital ikiz teknolojilerinin eğitim alanında, hangi araç ve platformlar üzerinden yararlanılabileceğine dair genel bir bakış sağlamaktır. Bu çerçevede, akademik alanda en etkili dergileri içermesi nedeniyle "Web of Science Core Collection" veri tabanı örneklem alanı olarak seçilmiş ve dijital ikiz teknolojileri kapsamında yayınlanan dergi makaleleri analize dahil edilmiştir. Web of Science veri

tabanından elde edilen veriler, ücretsiz ve kullanım kolaylığı nedeniyle, VOSviewer 1.6.20 yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz süreci iki aşamalı olarak kurgulanmıştır. Birinci aşama, dijital ikiz teknolojilerinin mimarlık, mühendislik ve inşaat (AEC) endüstrisinde kullanımına, ikinci aşamada ise dijital ikiz teknolojilerinin mimarlık, mühendislik ve kentsel planlama-tasarım eğitimi özelinde kullanımına yönelik durum tespitini içermektedir.

3.1. Dijital İkiz Teknolojilerinin AEC Endüstrisinde Kullanımı

İlk aşamada WoS veri tabanında, “digital twin” OR “digital twin technologies” AND “architecture” OR “engineering” OR “construction” OR “AEC” kavramları ile yapılan tarama sonucunda 4387 adet makaleye ulaşılmıştır. Mimarlık, mühendislik ve inşaat disiplinleri ile ilişkili olan alt disiplinler ve dili İngilizce olan makaleler ile sınırlandırıldığında 3788 adet makale analize dahil edilmiştir.

Web of Science veritabanında yapılan sınırlamalar sonucunda elde edilen makalelerin;

- Atıf sayısı analizi, en az 10 atıf alan makaleler ile sınırlandırılmış ve 1295 makale analize dahil edilmiştir. En çok atıf alan ilk 5 makale Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1: Web of Science veri tabanında en çok atıf alan ilk 5 makale

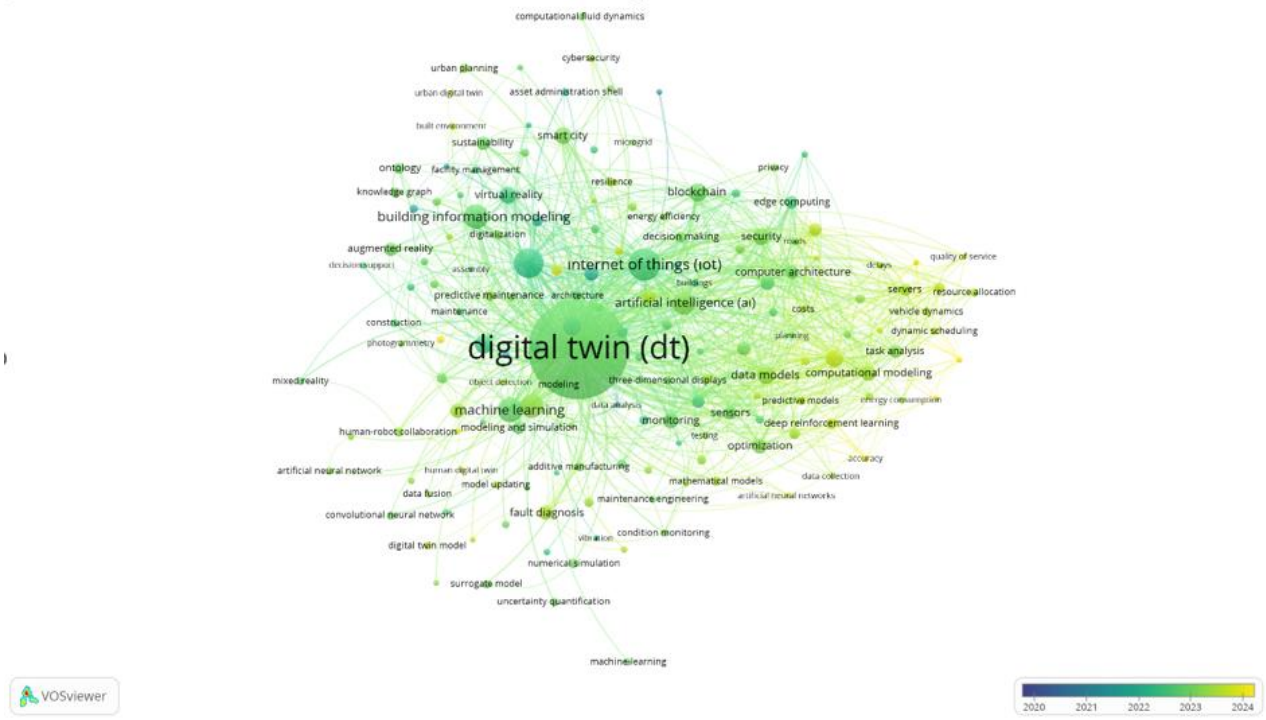
Yazar Adı	Makale Başlığı	Yayın Yılı	İçeriği	Atıf Sayısı
Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C.; Barlow, C.	Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research	2020	Dijital İkizler için olanak sağlayan teknolojiler, zorluklar ve açık araştırmaların bir değerlendirmesi	844
Rasheed, A.; San, O.; Kvamsdal, T.	Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective	2020	Modelleme perspektifinden dijital ikizlerin inşasıyla ilgili metodolojileri ve teknikleri	737
Schleich, B.; Anwer, N.; Mathieu, L.; Wartzack, S.	Shaping the digital twin for design and production engineering	2017	Tasarım ve üretimde fiziksel ürünün dijital ikizi olarak hizmet eden Skin Model Shapes kavramına dayalı bir referans model önerisi	681
Qi, Q.L.; Tao, F.; Hu, T.L.; Anwer, N.; Liu, A.; Wei, Y.L.; Wang, L.H.; Nee, A.Y.C.	Enabling technologies and tools for digital twin	2021	5 boyutlu dijital ikiz modeli perspektifinden, dijital ikiz uygulamaları için teknolojiler ve araçlar	667
Tao, F.; Qi, Q.L.; Wang, L.H.; Nee, A.Y.C.	Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison	2019	Siber-fiziksel sistemler ve dijital ikiz teknolojileri	598

- Makalelerin yayın yılları incelendiğinde, ilk yayının 2017 yılında yapıldığı ancak 2 yıllık bir süreçte konu ile ilgili yayın sayısında kayda değer bir artış olmadığı, bu alanda yapılan çalışmaların 2019 yılı ve sonrasında yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 4). 2025 yılında 173 makale yayımlandığı tespit edilmiştir ancak henüz 1 yıllık bir zaman dilimini kapsamaması nedeniyle Şekil 5’teki grafikte yer verilmemiştir.



Şekil 5. Web of Science veri tabanında yer alan yayınların yıllara göre dağılımı.

- 3788 makalede toplam 11252 adet anahtar kelimenin yer aldığı tespit edilmiştir. VOSviewer yazılımı ile yapılan analizde, en az 10 kere tekrar edilen anahtar kelimeler analize dahil edilmiştir. Bu sınırlandırma ile elde edilen 199 anahtar kelime incelendiğinde eş anlamlı anahtar kelimelerin yer aldığı görülmüştür. VOSviewer yazılımında eş anlamlı kelimeler birleştirilmiş (Tablo 2) ve 155 anahtar kelime veri setini oluşturmuştur.



Şekil 7. Anahtar kelimelerin yıllara göre dağılımı.

Tablo 3: Dijital ikiz kavramı ile en sık kullanılan ilk 25 anahtar kelimeler.

Anahtar kelime	Makale sayısı	Toplam bağlantı sayısı
internet of things (iot)	265	901
industry 4.0	215	568
machine learning	163	298
building information modeling (bim)	156	328
deep learning	142	268
modeling and simulation	134	279
artificial intelligence	127	489
blockchain	102	380
cyber-physical systems	86	209
data models	82	457
smart manufacturing	76	191
security	74	326
smart city	74	196
virtual reality	74	181
optimization	60	252
computational modeling	58	337
modeling and simulation	56	101
structural health monitoring	54	99
fault diagnosis	52	115
sensors	50	232
6g mobile communication	49	273
computer architecture	49	269
reinforcement learning	48	107
cloud computing	47	232
augmented reality	46	104

3.2. Dijital İkiz Teknolojileri ve Eğitim Alanı (Mimarlık, Mühendislik, Kentsel Tasarım)

Bu aşama iki adımda gerçekleştirilmiştir.

1. Adım:

İlk adımda WoS veri tabanında, “digital twin” OR “digital twin technologies” AND “architecture education” OR “engineering education” OR “architectural design education” OR “urban planning education” OR “urban design education” kavramları ile yapılan tarama sonucunda 58 adet makaleye ulaşılmıştır. Mimarlık, mühendislik ve inşaat disiplinleri ile ilişkili olan alt disiplinler ve dili İngilizce olan makaleler ile sınırlandırıldığında 15 adet makale analize dahil edilmiştir.

Web of Science veritabanında yapılan sınırlamalar sonucunda elde edilen makalelerin;

- Yıllara göre dağılımı Tablo 4’ te sunulmuştur.

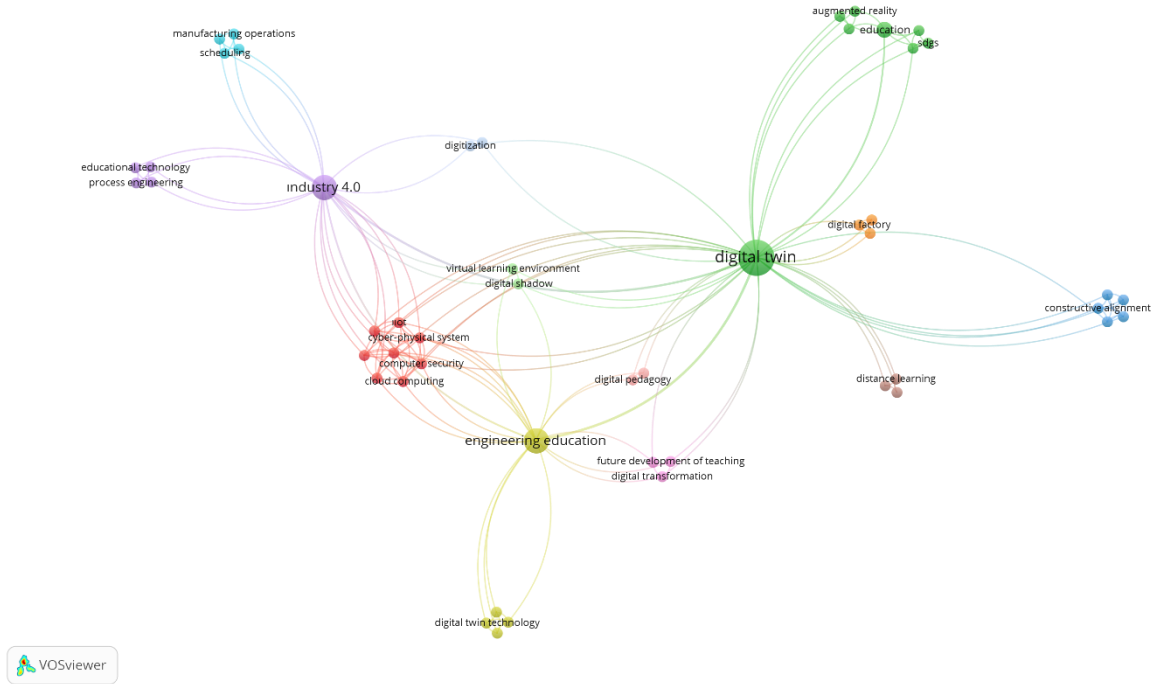
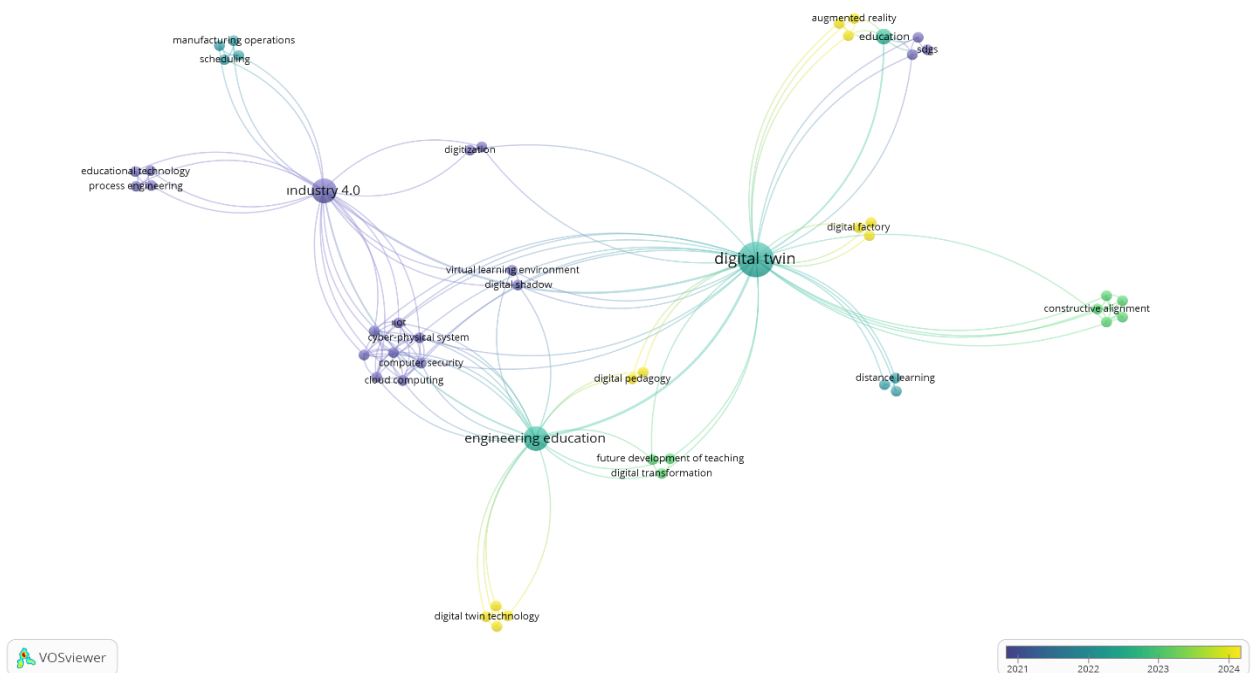
Tablo 4: Dijital ikiz ve eğitim alanında, Web of Science veri tabanında yer alan yayınların yıllara göre dağılımı.

Yayın Yılı	2020	2021	2022	2023	2024
Yayın sayısı	1	4	4	2	5

- 15 makalede toplam 65 anahtar kelimenin kullanıldığı görülmüştür. Tablo 5' te birleştirilen eş anlamlı kelimeler ve Şekil 8-9' da veri setinin sadeleştirilmesi ile elde edilen 61 anahtar kelime ve birbirleri ile olan ilişkilerinin yer aldığı ağ diyagramı verilmiştir.

Tablo 5: Eş anlamlı anahtar kelimelerin veri setinde sadeleştirilmesi.

Mevcut anahtar kelime	Analizde yer verilen anahtar kelime
industrial internet of things	iiot
industry 4	industry 4.0

**Şekil 8.** Dijital ikiz ve eğitim alanındaki anahtar kelimelerin dağılımı ve ilişki diyagramı.**Şekil 9.** Dijital ikiz ve eğitim alanındaki anahtar kelimelerin yıllara göre dağılımı.

2. Adım:

Alan çalışmasının ilk adımında “eğitim” anahtar kelimesi kullanılarak yapılan tarama sonucunda ulaşılan 15 makale sayısının yetersiz olması nedeniyle, ikinci adımda Tablo 3’te yer alan anahtar kelimelerden, dijital ikiz ve eğitim alanı arakesitinde yer aldığı düşünülen kavramlar taramaya dahil edilmiştir.

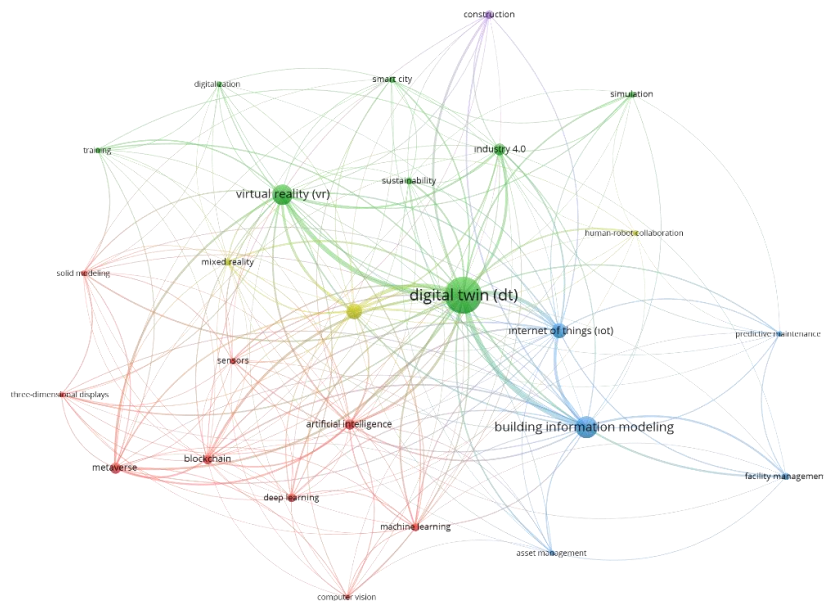
Buna göre “digital twin” OR “digital twin technologies” AND “architecture education” OR “architectural design education” OR “engineering education” OR “urban planning education” OR “urban design education” OR “BIM” OR “augmented reality” OR “virtual reality” kavramları ile yapılan tarama sonucunda 1509 adet makaleye ulaşılmıştır. Mimarlık, mühendislik ve inşaat disiplinleri ile ilişkili olan alt disiplinler ve dili İngilizce olan makaleler ile sınırlandırıldığında 776 adet makale analize dahil edilmiştir.

Web of Science veritabanında yapılan sınırlamalar sonucunda elde edilen 776 makalede toplam 2592 adet anahtar kelimenin yer aldığı tespit edilmiştir. VOSviewer yazılımı ile yapılan analizde, en az 10 kere tekrar edilen anahtar kelimeler analize dahil edilmiştir. Bu sınırlandırma ile elde edilen 44 anahtar kelime incelendiğinde eş anlamlı anahtar kelimelerin yer aldığı görülmüştür. VOSviewer yazılımında eş anlamlı kelimeler birleştirilmiş (Tablo 6) ve 26 anahtar kelime, veri setini oluşturmuştur.

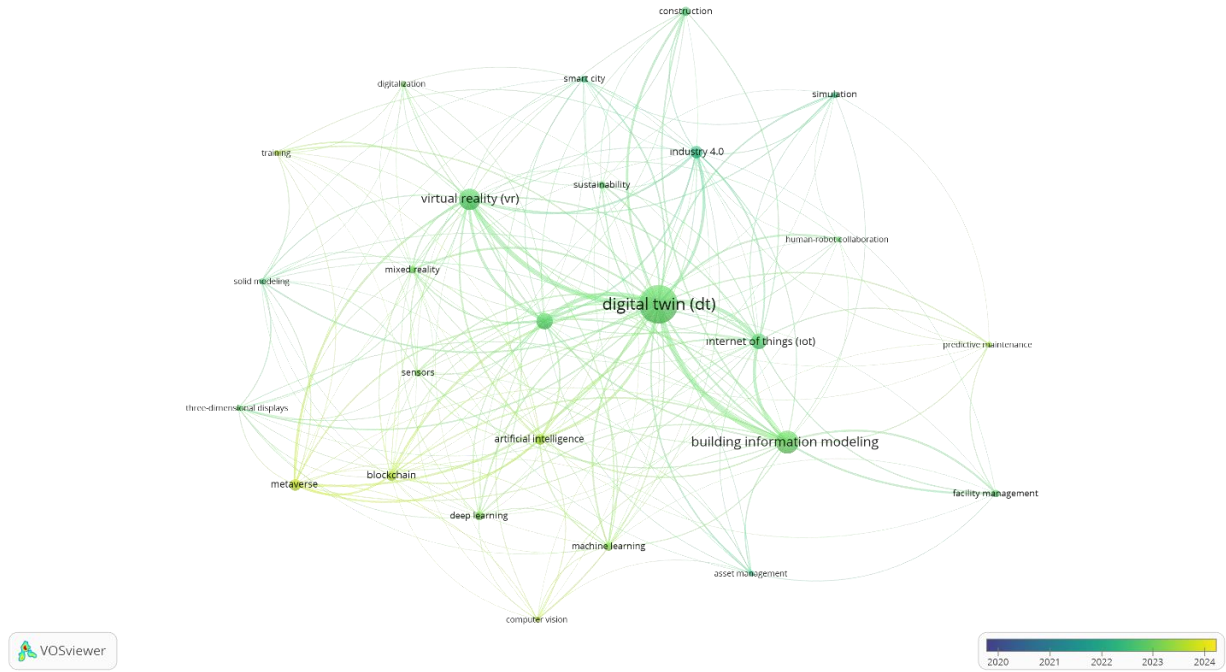
Tablo 6: İkinci aşamanın ikinci adımında elde edilen eş anlamlı anahtar kelimelerin veri setinde sadeleştirilmesi.

Mevcut anahtar kelime	Analizde yer verilen anahtar kelime
ai	artificial intelligence
augmented reality	augmented reality (ar)
extended reality	
building information modeling	building information modeling (bim)
building information modelling	
building information modeling	
bim	
blockchains	blockchain
construction industry	construction
digital twin	digital twin (dt)
digital twins	
internet of things	internet of things (iot)
internet of things	
iot	industry 4.0
industry 4	
virtual reality	virtual reality (vr)
vr	

Analize dahil edilen anahtar kelimeler ve birbirleri ile olan ilişkilerinin yer aldığı ağ diyagramı Şekil 10 ve Şekil 11’de verilmiştir. Analiz edilen 26 anahtar kelimenin kullanım sıklığı incelendiğinde; “digital twin (dt)” 495 makalede yer almıştır. Tablo 7’de dijital ikiz teknolojileri ve eğitim alanında kullanılan anahtar kelimeler sunulmuştur. Bu alanda yapılan çalışmalarda, yapı bilgi modellemesi, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik, nesnelerin interneti, yapay zekâ, derin öğrenme, makine öğrenmesi gibi araştırma konularının yer aldığı görülmektedir.



Şekil 10. Dijital ikiz ve eğitim alanındaki anahtar kelimelerin yıllara göre dağılımı.



Şekil 11. Dijital ikiz ve eğitim alanındaki anahtar kelimelerin yıllara göre dağılımı.

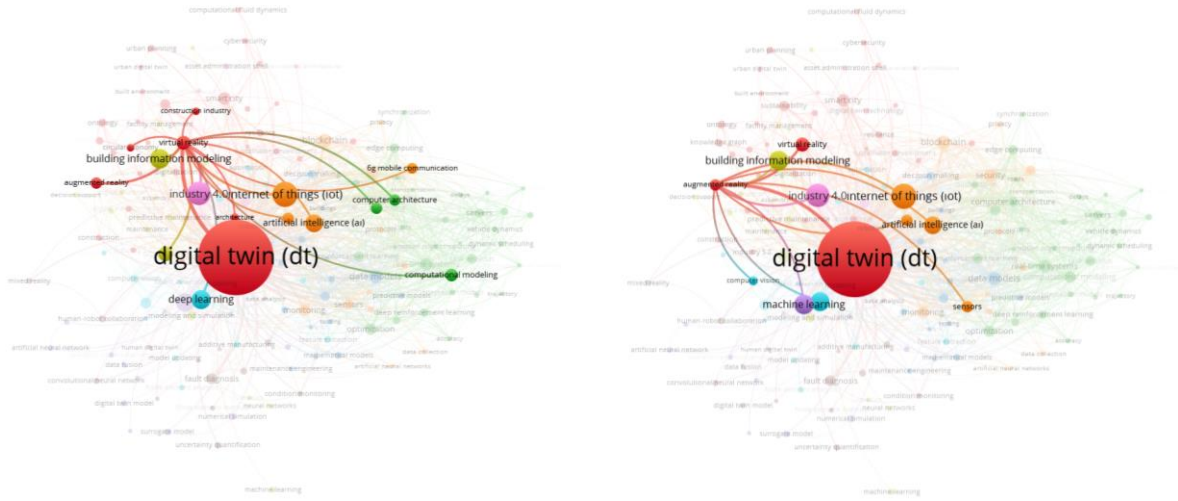
Tablo 7: Dijital ikiz teknolojileri ve eğitim alanında kullanılan anahtar kelimeler.

Anahtar kelime	Makale sayısı	Toplam bağlantı sayısı
digital twin (dt)	495	634
building information modeling (bim)	176	277
virtual reality (vr)	155	252
augmented reality (ar)	96	196
internet of things (iot)	83	194
industry 4.0	53	104
metaverse	43	105
artificial intelligence	42	126
blockchain	34	88
construction	28	53
deep learning	27	41
machine learning	23	56
facility management	21	47
sustainability	21	36
mixed reality	19	56
sensors	17	48
simulation	15	31
smart city	14	29
solid modeling	13	45
asset management	12	31
computer vision	12	31
human-robot collaboration	12	25
three-dimensional displays	12	37
digitalization	11	21
predictive maintenance	11	28
training	11	35

Çalışma kapsamında elde edilen makalelerin içerikleri incelendiğinde dijital ikizin ilişkili olduğu kavramlardan; Yapı Bilgi Modellemesi, Nesnelerin İnterneti (IoT), Sanal Gerçeklik (VR), Artırılmış Gerçeklik (AR), İşbirlikçi Öğrenme (Bulut Tabanlı) ve Akıllı Şehir ve Altyapı Öğrenme Araçlarının eğitim sürecinin bir parçası olarak ele alınabileceği öngörülmüştür. Aşağıda bu kavramlarla ilgili kısa açıklamalara yer verilmiştir.

a. Yapı Bilgi Modellemesi (BIM)

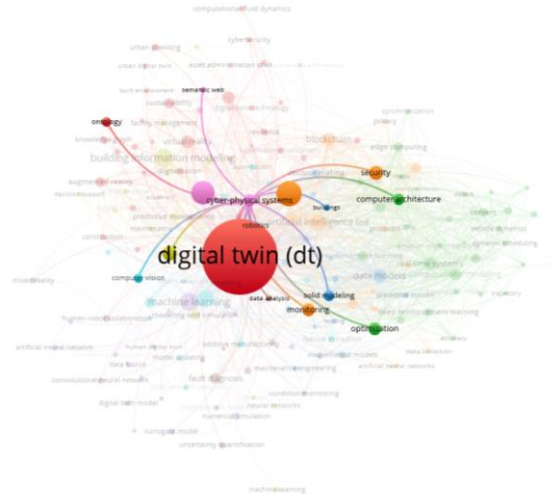
Şekil 12' de verilen diyagramda Yapı Bilgi Modellemesi'nin dijital ikiz ile güçlü bir ilişkisinin olduğu görülmektedir. Analize dahil edilen makaleler incelendiğinde; Autodesk Revit ve Bentley Systems gibi platformların, dijital ikiz teknolojilerinin Yapı Bilgi Modellemesi ile entegre edilmesini ve bina tasarımlarının gelişmiş simülasyonuna, enerji verimliliği analizine ve yapısal testlerin yapılmasını olanak sağladığı ifade edilebilir.



Şekil 14. Sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR) kavramının ilişkili olduğu anahtar kelimeler.

d. Siber-Fiziksel Sistemler (CPS)

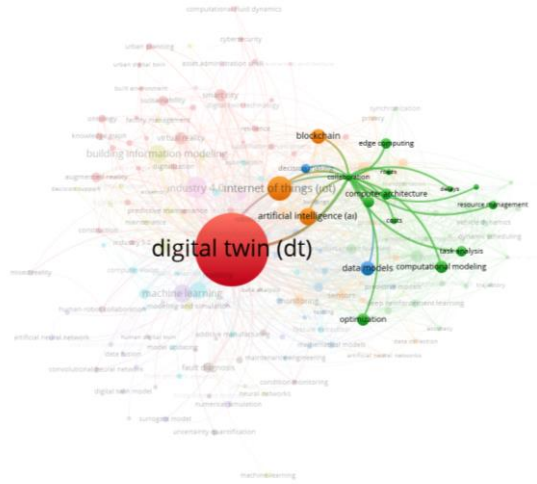
Şekil 15’te verilen diyagramda Siber-Fiziksel Sistemler (CPS)’in dijital ikiz ile ilişki kurduğu görülmektedir. Analize dahil edilen makaleler incelendiğinde; MATLAB/Simulink ve AnyLogic gibi platformların yapısal analiz, otomatik üretim ve akıllı altyapı için DT odaklı siber-fiziksel sistemleri simüle etmeye olanak sağladığı ifade edilebilir.



Şekil 15. Siber-fiziksel sistemler (CPS) kavramının ilişkili olduğu anahtar kelimeler.

e. İşbirlikçi Öğrenme (Bulut Tabanlı)

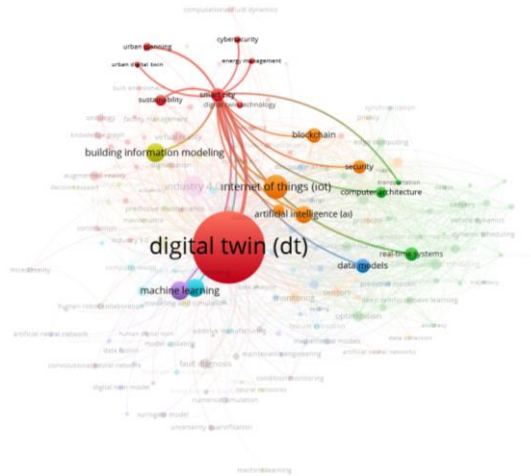
Şekil 16’da verilen diyagramda İşbirlikçi Öğrenme’nin dijital ikiz ile ilişki kurduğu görülmektedir. Analize dahil edilen makaleler incelendiğinde; Microsoft Azure Dijital İkizleri ve Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE gibi bulut hizmetlerinin, işbirlikçi öğrenme ve araştırma için ölçeklenebilir, gerçek zamanlı DT eğitim ortamlarına olanak sağladığı ifade edilebilir.



Şekil 16. İşbirlikçi tasarım kavramının ilişkili olduğu anahtar kelimeler.

f. Akıllı Şehir ve Altyapı Öğrenme Araçları

Şekil 17’de verilen diyagramda akıllı şehir ve altyapı öğrenme araçlarının dijital ikiz ile ilişki kurduğu görülmektedir. Analize dahil edilen makaleler incelendiğinde; CityGML gibi kentsel dijital ikiz araçlarının, öğrencilerin ulaşım sistemlerini modellemeye, çevresel etkiyi değerlendirmeye ve afet müdahale senaryolarını simüle etmeye olanak sağladığı ifade edilebilir.



Şekil 17. Akıllı şehirler kavramının ilişkili olduğu anahtar kelimeler.

4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Mimarlık, mühendislik ve inşaat (AEC) endüstrilerindeki dijital ikizler, gerçek zamanlı verilerle tasarım sürecini kolaylaştırır, sanal test ve optimizasyon ile verimliliği artırır (Sepasgozar, 2020). Aynı zamanda, mimarların, mühendislerin ve proje yöneticilerinin sanal ortamlarda iş birliği yaparak disiplinler arası çalışma ile gerçek zamanlı geri bildirim sağlayarak süreç içerisinde ortaya çıkabilecek sorunlara karşı çözümler üretmeyi ve hataları en aza indirmeyi sağlar (Motyl vd., 2017; Elmahadi ve Osman, 2020; Bashabsheh vd., 2021). Bu noktada Mimari tasarım eğitiminin dönüşümü kapsamında DT'lerin eğitim alanı üzerindeki potansiyelleri ve sınırlılıklarını tespit etmeyi amaçlayan bu çalışma, dijital ikiz teknolojileri ve dijital ikiz tabanlı öğrenme platform ve araçlarının, öğrencilere deneysel öğrenmeyi teşvik eden etkileşimli, sanal bir ortamda problem çözme becerilerini geliştirmelerine olanak tanıyarak proje tabanlı öğrenme metodolojilerini destekleyebileceğini göstermektedir. Böylece öğrencilerin, fiziksel uygulamadan önce tasarım performansını simüle etme ve analiz etme yeteneğini erken aşamalarda kazanarak, disiplinler arası çalışmaya ve karmaşık sistemlere ilişkin bir anlayış geliştireceği öngörülmektedir. Çalışma kapsamında eğitim süreci ve dijital ikiz teknolojilerinin arakesitinde bulunan ve sistematik bir şekilde eğitim müfredatlarına dahil edilmesi önerilen dijital ikiz teknolojilerinin potansiyelleri ve sınırlılıkları maddeler halinde aşağıda sunulmuştur.

- Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), Dijital İkiz (DT) teknolojisi ile entegre edildiğinde, tasarım eğitiminin potansiyelini önemli ölçüde artırır. BIM, inşaat projelerinin ayrıntılı görselleştirilmesini, doğru modellemesini ve bilgi açısından zengin yönetimini kolaylaştırır. DT, bina yaşam döngüsü boyunca dinamik simülasyon, gerçek zamanlı izleme ve tahmine dayalı analize izin vererek bunu tamamlar ve böylece mimarlık ve mühendislik eğitiminde daha etkili öğrenme deneyimlerini teşvik eder. Bununla birlikte, çeşitli veri kümelerini entegre etmenin karmaşıklığı, teknolojiye yapılan yüksek ilk yatırım ve akademik müfredatı hızla gelişen endüstri uygulamalarıyla uyumlu hale getirmenin zorlukları gibi önemli sınırlamalar devam etmektedir.
- Nesnelerin İnterneti (IoT), gerçek zamanlı veri toplamayı, bağlantıyı ve gelişmiş analitiği kolaylaştırarak DT teknolojilerinin eğitimdeki yeteneğini önemli ölçüde artırır. IoT destekli DT'ler, eğitim kurumlarının operasyonel senaryoları simüle etmesine, bakım gereksinimlerini tahmin etmesine ve karar verme süreçlerini geliştirmesine olanak tanıyarak yüksek düzeyde etkileşimli öğrenme ortamları sunar. Ancak, veri güvenliği endişeleri, birlikte çalışabilirlik, teknik karmaşıklık ve altyapı gereksinimleri gibi sınırlamalar önemli engeller teşkil etmektedir. Bu sınırlamaların ele alınması, veri standardizasyonunda, siber güvenlik protokollerinde ve sağlam altyapı geliştirmede ilerlemeler gerektirir.
- Sanal Gerçeklik (VR) ve Artırılmış Gerçeklik (AR), DT ile entegre edildiğinde tasarım eğitimi için dönüştürücü etkilere sahiptir. Bu teknolojiler, gerçek dünya koşullarını yakından simüle eden etkileşimli sanal öğrenme ortamları oluşturarak öğrencilerin uzamsal bilişini ve pratik anlayışını önemli ölçüde geliştiren sürükleyici deneyimlere izin verir. Özellikle mimarlık ve inşaat disiplinlerinde VR ve AR, öğrencilerin etkileşimli simülasyonlar aracılığıyla deneyimsel öğrenme kazanmalarını sağlayarak risksiz senaryolarda tekrarlama, deney yapma ve hata yönetimi fırsatları sunar. Bu faydalara rağmen, sınırlamalar arasında yüksek uygulama maliyetleri, teknolojik karmaşıklık, eğitimciler için özel eğitimin gerekliliği ve taşıt tutması gibi potansiyel sağlık sorunları yer alır.
- DT çerçevelerine entegre edilen Siber-Fiziksel Sistemler (CPS), özellikle mimarlık, mühendislik ve peyzaj tasarımı gibi disiplinlerde faydalı olan sanal ve fiziksel dünyalar arasında köprü kurarak eğitim metodolojilerini önemli ölçüde geliştirir. CPS, gerçekçiliği ve etkileşimi geliştirir, daha derin katılımı teşvik eder ve kapsamlı öğrenme deneyimlerini kolaylaştırır. Bununla birlikte, sistem entegrasyonunun karmaşıklığı, önemli kaynak yatırımı ve gereken disiplinler arası uzmanlık gibi zorluklar, sistem entegrasyonunun eğitim bağlamlarında geniş çapta uygulanmasında önemli sınırlamalar getirmektedir.
- DT teknolojileriyle geliştirilen bulut tabanlı işbirlikçi öğrenme platformları, etkileşimli, esnek ve çok disiplinli eğitim ortamları için önemli fırsatlar sunar. Gerçek zamanlı iş birliğini, kapsamlı kaynak paylaşımını ve farklı coğrafi konumlardan erişilebilirliği kolaylaştırırlar, böylece işbirlikçi öğrenme deneyimlerini önemli ölçüde teşvik ederler. Bununla birlikte, bu tür platformlar, veri gizliliği, siber güvenlik, ağ güvenilirliği, veri depolama maliyetleri ve kullanıcılar arasındaki dijital okuryazarlıktaki eşitsizlikler dahil olmak üzere kritik zorluklarla karşı karşıyadır. Bu engellerin üstesinden gelmek, veri yönetimi, güvenlik, gizlilik ve altyapı geliştirmenin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini gerektirir.
- DT teknolojilerinden yararlanan akıllı şehir ve altyapı öğrenme araçları, eğitimciler ve öğrencilere karmaşık kentsel sistemleri ve altyapı yönetimini incelemek için sürükleyici ve etkileşimli simülasyon platformları sağlar. DT uygulamaları, gerçek zamanlı izlemeyi, senaryo tabanlı simülasyonları ve tahmine dayalı analitiği kolaylaştırarak kentsel yönetim ve altyapı performansına ilişkin kapsamlı bilgiler sunar. Bununla birlikte, tüm kentsel ortamları doğru bir şekilde modellemenin, çeşitli veri türlerini entegre etmenin ve veri tutarlılığını korumanın karmaşıklığı önemli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Ek olarak, gelişmiş teknolojik altyapılara yapılan önemli yatırımlar ve gerekli disiplinler arası uzmanlık önemli engeller oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, Dijital İkiz teknolojileri, gerçekçi, veri odaklı ve işbirlikçi öğrenme deneyimleri sağlayarak tasarım eğitiminde devrim yaratma konusunda büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak, bunların uygulanması teknik, finansal ve etik zorluklarla sınırlıdır. DT teknolojilerinin faydalarından tam olarak yararlanmak için eğitim kurumları, veri güvenliği ve erişilebilirlikle ilgili endişeleri ele alırken altyapıya, öğretim elemanı eğitime ve müfredat geliştirmeye yatırım yapılmalıdır.

Bu çalışma ile DT'lerin bu alanda sahip olabileceği derin etkiyi vurgulayarak, DT tanımları, uygulamaları, potansiyelleri ve sınırlılıkları hakkında derinlemesine bir inceleme sağlamıştır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler, günümüz eğitimcilerine dijital ikiz teknolojilerinin potansiyel ve olanaklarını keşfetmeleri için bir perspektif sunmaktadır. Bu yönüyle sunulan bu çalışmanın dijital ikiz teknolojilerinin eğitim özelinde kullanımı ile ilgili müfredat geliştirmeye yönelik gelecek araştırmalara katkıda bulunacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Bashabsheh, A., Altaher, A., & Amireh, K. (2021). The application of digital twin technology in the construction industry: A review. *Construction Innovation*, 21(3), 345-368.
- Boschert, S., & Rosen, R. (2016). Digital Twin—The Simulation Aspect. In: Hehenberger, P., Bradley, D. (eds) *Mechatronic Futures*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
- Botkina, D., Hedlind, M., Olsson, B., Henser, J., & Lundholm, T. (2018). Digital twin of a cutting tool. *Procedia Cirp*, 72, 215-218.
- De Los Santos Melo, A., & Beriguete Alcántara, F. E. (2024). Maximizing Learning Potential: Embracing the Power of Digital Twins in Architectural and Construction Education. In D. Bienvenido-Huertas et al. (Eds.), *Teaching Innovation in Architecture and Building Engineering*. Springer Nature Switzerland.
- Elmahadi, I., & Osman, R. (2020). Enhancing engineering education through digital twins: A case study. *Journal of Engineering Education*, 109(4), 675-694.
- Francisco, A., Mohammadi, N., & Taylor, J. E. (2020). Smart city digital twin-enabled energy management: Toward real-time urban building energy benchmarking. *Journal of Management in Engineering*, 36(2), 04019045.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. *IEEE access*, 8, 108952-108971.
- Gharineiat, Z., Karimi, A. A., & McDougall, K. (2024). Urban digital twin frameworks for predictive maintenance. *Journal of Urban Analytics*, 15(3), 147–169. <https://doi.org/10.1016/j.urban.2024.03.005>
- Grieves, M. (2005). Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*, 2(1/2), 71-84. <https://doi:10.1504/ijpd.2005.006669>
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches* (pp. 85–113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- Karimi, A. A., McDougall, K., & Mousavi, Y. (2024). Integrating geospatial data with digital twins for urban resilience. *International Journal of Geospatial Analysis*, 10(4), 88–110. <https://doi.org/10.1007/s12345-024-00987-6>
- Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., & Holmström, J. (2019). Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. *IEEE access*, 7, 147406-147419.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *Ifac-PapersOnline*, 51(11), 1016-1022.
- Li, X., Liu, H., Wang, W., Zheng, Y., Lv, H., & Lv, Z. (2022). Big data analysis of the internet of things in the digital twins of smart city based on deep learning. *Future Generation Computer Systems*, 128, 167-177.
- Liljaniemi, A., & Paavilainen, H. (2020). Using digital twin technology in engineering education—course concept to explore benefits and barriers. *Open Engineering*, 10(1), 377-385.
- Lu, Q., Xie, X., Parlikad, A. K., & Schooling, J. M. (2020). Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance. *Automation in Construction*, 118, 103277.
- Motyl, B., Baronio, G., Uberti, S., Speranza, D., & Filippi, S. (2017). How will change the future engineers' skills in the Industry 4.0 framework? A questionnaire survey. *Procedia manufacturing*, 11, 1501-1509.
- Mousavi, Y., Gharineiat, Z., Karimi, A. A., McDougall, K., Rossi, A., & Gonizzi Barsanti, S. (2024). Digital Twin Technology in Built Environment: A Review of Applications, Capabilities and Challenges. *Smart Cities*, 7(5), 2594-2615.
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia manufacturing*, 11, 939-948.
- 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.

- Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L. & Nee, A. Y. (2019). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3-21.
- Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE access*, 8, 21980-22012.
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP annals*, 66(1), 141-144.
- Sepasgozar, S. (2020). Digital twin applications for construction: Current trends and future perspectives. *Construction Innovation*, 20(3), 343–361.
- Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A., & Calinescu, A. (2022). Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions. *Journal of Industrial Information Integration*, 30, 100383.
- Tao, F. & Qi, Q. (2019). *Make more digital twins*. Nature.
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 3563-3576.
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), 653-661.
- Tuegel, E. J., Ingraffea, A. R., Eason, T. G., & Spottswood, S. M. (2011). Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011(1), 154798.
- White, G., Zink, A., Codecá, L., & Clarke, S. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110, 103064.
- Wu, Y., Zhou, L., Zheng, P., Sun, Y., & Zhang, K. (2022). A digital twin-based multidisciplinary collaborative design approach for complex engineering product development. *Advanced Engineering Informatics*, 52, 101635.