



# BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ SAĞLIK BİLİMLERİ VE ARAŞTIRMALARI DERGİSİ BANU Journal of Health Science and Research

DOI: 10.46413/ boneyusbad. 1440963

Derleme / Review

## Sağlık Hizmetlerinde Çığır Açan Uygulamalar: İnsan Dijital İkizi ile Geleceğe Yolculuk Groundbreaking Applications in Healthcare: Journey to the Future with the Human Digital Twin

Gözde ÖZSEZER<sup>1</sup> Gülengül MERMER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Arş. Gör., Çanakkale  
Onsekiz Mart Üniversitesi,  
Sağlık Bilimleri Fakültesi,  
Halk Sağlığı Hemşireliği  
Anabilim Dalı, Çanakkale

<sup>2</sup> Doç. Dr., Ege Üniversitesi,  
Hemşirelik Fakültesi, Halk  
Sağlığı Hemşireliği Anabilim  
Dalı, İzmir

**Sorumlu yazar / Corresponding  
author**

Gözde ÖZSEZER

gozdeozsezer@hotmail.com

**Geliş tarihi / Date of  
receipt:** 21.02.2024

**Kabul tarihi / Date of  
acceptance:** 01.11.2024

**Atf / Citation:** Özsezer, G.,  
Mermer, G. (2024). Sağlık  
hizmetlerinde çığır açan  
uygulamalar: İnsan dijital ikizi  
ile geleceğe yolculuk. *BANU  
Sağlık Bilimleri ve  
Araştırmaları Dergisi*, 6(3),  
648-665. doi: 10.46413/  
boneyusbad.1440963

### ÖZET

Dijital ikiz, "yaşam döngüsü boyunca bir ürün veya sistemin sanal bir kopyası" olarak tanımlanmaktadır. Sağlık paradigmasının dijital ikizi etkileşimlidir ve insanların anlaması için basittir. Bireyler, kendilerini daha sağlıklı bir yaşam sürmeye motive eden dijital ikize sahip olabilmektedir. Sağlık verilerini değerlendirmek için dijital ikiz kullanmak, şeffaflığı artırmakta ve tedavi boyunca güven oluşturmaktadır. Dijital ikiz ile araştırmacılar gerçek zamanlı verilere, simülasyon sonuçlarına ve çözümlere erişebilmekte ve yüzlerce operasyonel görevi uzun mesafeden verimli bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. Sağlık hizmetlerinde çeşitli dijital ikiz teknolojileri kullanılmaktadır. Hastanın sağlığı, tedavisi ve bakımı ile ilgili hizmet maliyetlerinde azalma, kalitatif hizmetler, toplumsal aksaklıklarla ilgili konular vb. açısından hizmetlerde kullanılmaktadır. Bu hizmetler, hızlı iyileşme sağlamak için tedavi boyunca hastanın bakımındaki iyileşmeyi daha iyi yansıtmaktadır. Bu çalışmada "sağlık hizmetlerinde insanlar için dijital ikiz kullanılabilir mi?" sorusuna yanıt aranmaktadır. Ayrıca bu çalışmanın amacı literatür ışığında dijital ikiz, insan dijital ikizi kavramının model ve özelliklerini vurgulamak, sağlık hizmetlerindeki geleceğe yön veren son araştırmaları sunmaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Dijital ikiz, Sağlık, Dijital teknolojiler, Yapay zeka

### ABSTRACT

A digital twin is defined as "a virtual copy of a product or system throughout its life cycle." The digital twin of the health paradigm is interactive and simple for people to understand. Individuals can have a digital twin that motivates them to live a healthier life. Using a digital twin to evaluate health data increases transparency and builds trust throughout treatment. With a digital twin, researchers have access to real-time data, simulation results, and solutions and can efficiently perform hundreds of operational tasks over long distances. Various digital twin technologies are used in healthcare. It is used in services in terms of reduction in service costs related to patient health, treatment, and care, qualitative services, issues related to social disruptions, etc. These services better reflect the improvement in the patient's care throughout the treatment to ensure rapid recovery. In this study, an answer to the question "Can digital twins be used for people in health services?" is sought. In addition, the aim of this study is to highlight the models and features of the concept of the digital twin, the human digital twin, in light of the literature and to present the latest research that shapes the future of health services.

**Keywords:** Digital twin, Health, Digital technologies, Artificial intelligence



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

## GİRİŞ

Dijital ikiz, “yaşam döngüsü boyunca bir ürün veya sistemin sanal bir kopyası” olarak tanımlanmaktadır (Haleem ve ark., 2023). Gerçek dünyadaki canlı ve cansız varlıkların birebir kopyaları olan dijital ikizler, gerçek zamanlı verileri kullanabilen, karar verme için akıl yürütme ve dinamik yeniden kalibrasyon sağlayan, gerçek zamanlı olarak değiştirilebilen ve güncellenebilen karmaşık bilgisayar modelleridir (Liu ve ark., 2019; Erol ve ark., 2020; Elayan ve ark., 2021).

Modern toplumlarda bireyler sağlık hizmetlerine daha fazla önem vermektedir. Ayaktan sağlık hizmeti başvurularında, yoğunluktan dolayı hekimler tanı için, hemşireler bakım için bireylere çok kısa süre, bazı zamanlarda birkaç dakika ayırabilmektedir. Sağlık profesyonelleri bir iş gününde yüzlerce hastaya bakmak zorunda kalmaktadır. Bu durumda, bireylerin sağlık ihtiyaçlarını karşılamak güçleşmektedir (Shengli, 2021). Küreselleşen dünyada hastanelere başvuru sayısını azaltabilmek, tanı, tedavi ve bakımın kalitesini ve verimliliğini artırabilmek, bireylerin sağlık durumunu yönetmesine yardımcı olabilmek için teknoloji kullanımı gereklidir. Bu nedenle, günümüzde akıllı tıp ve sağlık yönetimine oldukça önem verilmektedir. Bunları başarmak için dijital ikiz kullanımının karmaşık sorunları çözen etkili bir yolu olabileceği düşünülmektedir (Tao ve ark., 2019; El Saddik ve ark., 2019a; Shengli, 2021). Literatürde teknoloji kullanılarak gerçekçi dijital ikizlerin geliştirilmesinin daha fazla hasta-sağlık hizmeti talebi ile daha az sağlık profesyoneli hizmeti arasındaki çelişkiyi hafifletebileceği vurgulanmaktadır (Shengli, 2021; Haleem ve ark., 2023). Ayrıca, dijital ikizlerle kanserde olduğu gibi hastalığın nüksetme potansiyelini tanıyabilme, hastalık belirtilerini erken tespit eden simülasyonların kullanılmasıyla sağlık krizleri önlenmektedir. Dijital ikizlerin öngörü yetenekleri, yaşam tarzı eğilimlerini de tespit edebilmekte ve kullanıcıları sağlıklarına zarar verebilecek olağandışı davranışlar konusunda uyarabilmektedir (Patrone ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2020; Haleem ve ark., 2023).

Sağlık paradigmasının dijital ikizi etkileşimlidir ve insanların anlaması için basittir. Bireyler, kendilerini daha sağlıklı bir yaşam sürmeye motive eden dijital ikize sahip olabilmektedir. Sağlık verilerini değerlendirmek için dijital ikiz kullanmak, şeffaflığı artırmakta ve tedavi

boyunca güven oluşturmaktadır (Patrone ve ark., 2020; Zheng ve ark., 2021; Hassani ve ark., 2022).

Dijital ikiz, ortaya atıldığından bu yana ağırlıklı olarak üretim, ürün yaşam döngüsü yönetimi, endüstri 4.0 vb. alanlarda kullanılmaktadır (Tao ve ark., 2019; El Saddik ve ark., 2019b; Shengli, 2021; Haleem ve ark., 2023). Sürekli veri aktarımı, fiziksel bir nesnenin dijital ikizini sağlayarak sanal ve gerçek nesnelerin bir arada bulunmasını sağlamaktadır. Dijital bir ikizin geliştirilmesi, gerçek zamanlı verilerin toplanması ve arşivlenmesi ve elde edilen verilere dayalı olarak içgörülü bilgilerin sağlanması, dört teknolojinin bir dijital ikiz uygulamasına entegre edilmesiyle mümkün olmaktadır. Dijital ikiz teknolojileri nesnelerin interneti (internet of things- IoT), artırılmış gerçeklik (augmented reality-AR), bulut, yapay zekadan (artificial intelligence-AI) oluşmaktadır (James, 2021; Khan ve ark., 2022; Sahal ve ark., 2022). Bu teknolojiler insanların sağlık sonuçları hakkında kesin tahminler oluşturmak için gerçek zamanlı verileri kullanmaktadır (Fuller ve ark., 2020; Haleem ve ark., 2022; Haleem ve ark., 2023).

Bu çalışmada “sağlık hizmetlerinde insanlar için dijital ikiz kullanılabilir mi? sorusuna yanıt aranmaktadır. Ayrıca bu çalışmanın amacı literatür ışığında dijital ikiz, insan dijital ikizi kavramının model ve özelliklerini vurgulamak, sağlık hizmetlerindeki geleceğe yön veren son araştırmaları sunmaktır.

## Dijital İkiz Kavramı

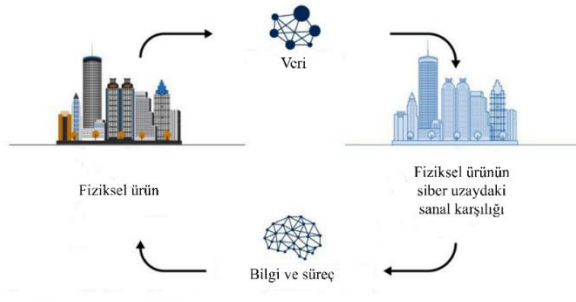
### Dijital İkizin Kökeni

Dijital ikiz fikrinin ortaya çıkması, 1970'lerde NASA (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi) tarafından başlatılan Apollo Programı'na kadar uzanmaktadır. Bu programda, görev sırasında ortam koşullarından etkilenme durumunu yansıtmak için iki özdeş uzay aracı inşa edilmiştir (Rosen ve ark., 2015). Ancak dijital ikiz kavramı, 2003 yılında ABD Michigan Üniversitesi'nde Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi dersinde "Fiziksel Ürüne Eşdeğer Sanal Dijital İfade" fikriyle Profesör Grievers tarafından kullanılmıştır. Grievers'e göre belirli bir cihazın bir veya bir grup dijital kopyası gerçek cihazı soyutlayabilmekte ve gerçek veya simüle edilmiş koşullar altında test için temel olarak kullanılabilir (Shengli, 2021). Dijital ikiz kavramı 2003-2005'te "Ayna Uzay Modeli" (Grievers, 2005) ve 2006-2010'da "Bilgi Aynası

Modeli" (Grieves, 2006) olarak adlandırılmıştır. Bu modeller, dijital İkiz'in tüm unsurlarına, yani fiziksel alana, siber uzaya ve aralarındaki bağlantı veya arayüze sahiptir. Dolayısıyla dijital ikizin temeli olarak kabul edilmektedir (Cunbo ve ark. 2017; Shengli, 2021).

Dijital ikizin kavramsal modeli temel olarak üç ana bölümden oluşmaktadır (Şekil 1):

1. Fiziksel mekânda fiziksel ürün;
2. Fiziksel ürünün siber uzaydaki sanal karşılığı;
3. Fiziksel mekân ve siber uzay arasındaki veri ve bilgi etkileşimi arayüzü.



### Şekil 1. Dijital ikizin kavramsal modeli

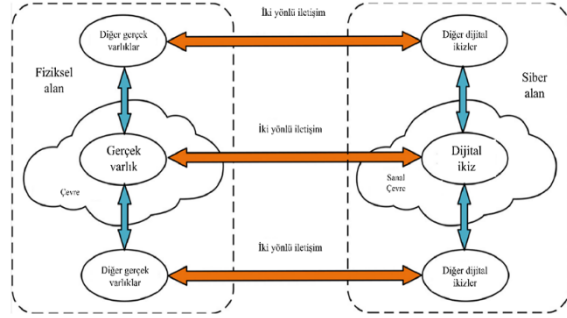
Kaynak: U.S. Government Accountability Office. (2023). Science & Tech Spotlight: Digital Twins—Virtual Models of People and Objects. <https://csiac.org/articles/digital-twins-virtual-models-of-people-and-objects/>

Dijital ikiz ile araştırmacılar gerçek zamanlı verilere, simülasyon sonuçlarına ve çözümlere erişebilmekte ve yüzlerce operasyonel görevi uzun mesafeden verimli bir şekilde gerçekleştirebilmektedir (Shengli, 2021). Dijital ikiz ile çıkarılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Alam ve El Saddik, 2017):

1. Dijital ikiz gerçek dünyadaki fiziksel varlığın siber dünyadaki dijital karşılığıdır.
2. Fiziksel varlık ile dijital muadili arasında iki yönlü iletişim kurulur.
3. Dijital muadili, fiziksel varlığın temsili veya modelidir. Dijital model, fiziksel varlığı gerçek zamanlı olarak canlı bir şekilde simüle edebilir.
4. Fiziksel varlığın ve çevresinin nitelikleri, parametreler, değişiklikler vb. akıllı sensörlerle tespit edilir. Bilgiler gerçek zamanlı ve gizli bir şekilde dijital modele taşınmalıdır.
5. Dijital ikiz; gerçek varlık, çalışma prensipleri veya mekanizmaları doğrultusunda modellendiği için tıpkı gerçek varlık gibi bilgiye göre davranır.

6. Dijital model, gerçek varlık gibi davranmanın yanı sıra, gerçek varlığı doğrulayabilir, optimize edebilir, değerlendirebilir, teşhis edebilir ve önerilerde bulunabilir. Veri analizleri, AI ile tahmin edebilir.

Tüm sistem bir geri bildirim döngüsü veya bir daire oluşturur.



### Şekil 2. Artırılmış dijital ikiz kavramsal modeli

Kaynak: Shengli, W. (2021). Is human digital twin possible?. *Computer Methods and Programs in Biomedicine Update*, 1, 100014.

## Artırılmış Dijital İkiz

Artırılmış dijital ikiz yalnızca gerçek varlığıyla değil, çevresiyle ve diğer dijital ikizlerle de etkileşime giren karmaşık bir sistemdir (Shengli, 2021). Artırılmış dijital ikiz sistemi, dijital muadili ve çevresini, diğer dijital ikizlerle ilişkisini, fiziksel varlık ve çevresini, diğer fiziksel varlıklarla olan ilişkiyi içermektedir. Dijital ikizler birbirleriyle iletişim kurmakta, aynı anda değişmekte, karşılıklı olarak etkileşime girmekte ve birbirlerini etkilemektedirler (Shengli, 2021; Halem ve ark., 2023). Sistem karmaşıktır ve zamanla güncellenebilir ve gelişebilir. Şekil 2'de artırılmış dijital ikizin kavramsal modeli görülmektedir.

## İnsan Dijital İkizi

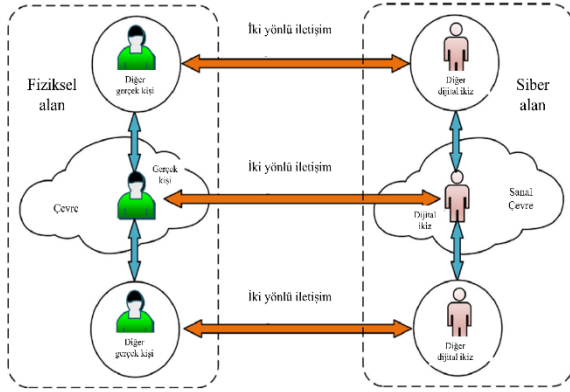
### İnsan Dijital İkiz Kavramı

İnsan dijital ikizi fiziksel dünyadaki gerçek bir kişinin siber uzaydaki bir kopyası veya karşılığıdır. Tıpkı siber uzaydaki insanın enkarnasyonu gibidir. Esasen yaş, boy, kilo, cinsiyet, akrabalar vb. bilgileri kaydeden bir model veya veri tabanıdır. Buluttaki bir bilgisayarda veya bir sunucuda bireylerin dijital olarak tanımlanmasıdır. Bireyler hakkındaki bilgiler değiştiğinde, kayıtlar da buna göre değişmektedir. Bilgi senkronizasyonu, gerçek kişi ile siber alan arasındaki iletişimin İnternet, 4G, 5G, WIFI vb. teknolojiler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Akıllı sensörler, cep

telefonları, hastaneler veya diğer kurumlar, siber uzaya ardışık olarak aktarılacak bilgileri gerçek zamanlı olarak almaktadır. Veri tabanına kaydedilen bilgiler buna göre güncellenmektedir. Ayrıca, bulut, AI vb. teknolojilerle geçmiş verileri, akrabalarından gelen verileri de analiz etmekte ve bu verilerden içgörüler çıkarmaktadır. Bu sayede bireylere tanı, sağlık tahmini, risk analizi veya sağlık önerileri gibi geri bildirimler sağlamaktadır (Barricelli ve ark., 2020; Saariluoma ve ark., 2021; Shengli ve ark., 2021; Bomström ve ark., 2022; Miller ve Spatz, 2022; Halem ve ark., 2023; Tang ve ark., 2024; Wang ve ark., 2024).

### İnsan Dijital İkizinin Kavramsal Modeli

İnsan dijital ikizi, artırılmış dijital ikiz modeline dayanmaktadır. Şekil 3'te insan dijital ikizi kavramsal modeli gösterilmektedir. Çevresel faktörlerin insanlar üzerinde etkisi bulunmaktadır. Dolayısıyla fiziksel varlık, sanal karşılığı ve aralarındaki iki yönlü iletişimin yanı sıra, fiziksel alana çevre de eklenmektedir. Ayrıca insanlar sosyal varlıklardır. Başkalarıyla iletişim kurmaya ihtiyaç duymaktadırlar. Nesilden nesile kalıtsal olabilen benzer genleri bulunmaktadır. Böylece siber uzaya diğer gerçek kişiler de eklenmektedir.



### Şekil 3. İnsan dijital ikizi kavramsal modeli

Kaynak: Shengli, W. (2021). Is human digital twin possible?. Computer Methods and Programs in Biomedicine Update, 1, 100014.

### İnsan Dijital İkizinin Özellikleri

Her bireyin siber uzayda bir dijital ikizi bulunur. Bu dijital ikiz, bireyin tüm kimlik bilgilerini saklayarak benzersiz bir dizin oluşturur. Bu dizin, dijital ikiz hesabına giriş yapmak ve kimlik doğrulaması için kullanılabilir (Barricelli ve ark., 2020; Saariluoma ve ark., 2021; Shengli ve ark., 2021; Bomström ve ark., 2022; Miller ve Spatz, 2022; Tang ve ark., 2024; Wang ve ark., 2024).

- **Hayat Boyu Yol Arkadaşı:** İnsan dijital ikizi, birey doğar doğmaz oluşturulur. Hastaneler, ebeveynler veya uzmanlar tarafından başlatılan bu süreç, bireyin yaşamının her aşamasında ona eşlik eder. Dahası, dijital ikiz, biyolojik bireyin gelecek nesillere aktaracağı genetik özelliklerin bir kısmını da dijital olarak taşıyabilir.
- **Gerçek Zamanlı Değişim ve Güncellemeler:** Gerçek kişinin yaşadığı her türlü fiziksel veya duygusal değişim, dijital ikizine gerçek zamanlı olarak aktarılır. Boy uzaması, tedaviler, duygusal tepkiler gibi tüm değişiklikler dijital ikize yansıtılır ve bu sanal yapı sürekli olarak güncellenir.
- **Sağlık Verilerinin Entegrasyonu:** Sağlık kurumlarında yapılan her türlü tedavi, muayene ve bağışıklama bilgisi bireyin izni doğrultusunda dijital ikizine aktarılır. Bu veri aktarımı, bireyin sağlık durumunun siber uzayda da takip edilmesini sağlar ve dijital ikizini sürekli günceller.
- **Giyilebilir Teknoloji ve Sensörlerle Entegrasyon:** Giyilebilir sensörler aracılığıyla kan basıncı, nabız, egzersiz durumu gibi veriler dijital ikize gönderilir. Aynı zamanda çevresel veriler de siber uzaya iletilir ve bu veriler dijital ikizin çevresinin de güncellenmesini sağlar. Blok zinciri teknolojisi, veri tutarlılığını koruyarak olası hataları izler ve düzeltir.
- **Sağlık Değerlendirmesi ve Akıllı Teşhis:** İnsan dijital ikizi, bireyin durumu hakkında değerlendirme yapabilen bir sisteme sahiptir. Büyük veri analizi, yapay sinir ağları ve IoT gibi teknolojilerle çalışan bu sistem, bireyin sağlık durumunu izleyerek hastane personeline veya gerçek kişiye rehberlik edici önerilerde bulunabilir. Gerektiğinde tedavi programları sunar, acil durumlarda ise hızlı müdahaleler yapar.
- **AR Teknolojisi ile Dinamik Görüntüleme:** Sağlık personeli, dijital ikiz sistemi aracılığıyla bireyin 3D görüntüsünü canlı olarak izleyebilir. AR teknolojisi sayesinde, bireyin sağlık durumu dinamik olarak görüntülenebilir.

ve 3D rekonstrüksiyon teknolojisiyle iç organlar bile incelenebilir.

- **Gizlilik ve Güvenlik:** Dijital ikiz sistemine giriş ve veri erişimi, parola, parmak izi tanıma, iris tarama gibi güvenlik önlemleri ile korunur. Erişim hakkı bireyin kendisi ya da çocuklar için ebeveynleri tarafından yönetilir. Blok zinciri teknolojisi, yetkisiz erişimleri önlemek için kullanılır.
- **Güvenli ve Doğrulanmış Erişim:** Tıbbi kurumlar ve bireyler, dijital ikiz sistemine giriş yaparken kimlik doğrulama işlemlerinden geçerler. Güvenlik açıklarını tespit eden sistemler sayesinde güvenli bir bağlantı sağlanır ve IP adresi doğrulaması ile veri güvenliği korunur. Edge Computing teknolojisi, bu güvenliği daha da artırarak dinamik erişim kontrolleri sağlar.

Bu şekilde, insan dijital ikizi hayat boyunca hem bireyin fiziksel hem de dijital dünyada sağlığını takip eden, güncellenen ve güvenli bir şekilde koruyan bir yapı haline gelir.

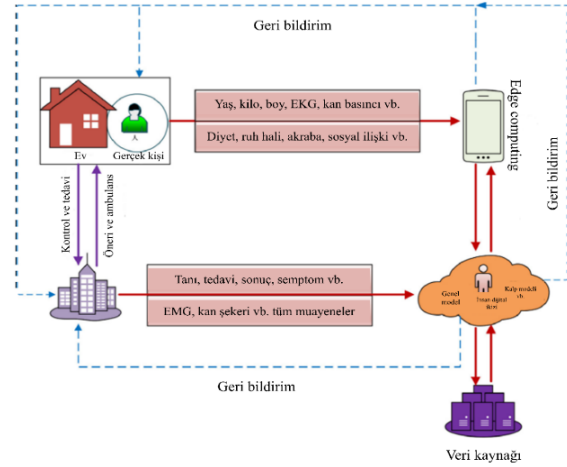
### Bir İnsan Dijital İkizi Oluşturma

Bu bölümde, insan dijital ikizinin oluşturulma basamakları verilmiştir. İnsan dijital ikizi sisteminin nasıl kurulacağını yorumlamak için öncelikle insan dijital ikizi sisteminin bilgi akış şeması üretilmiş, daha sonra insan dijital ikizi uygulama katmanı mimarisi ve sistem uygulama yaklaşımı sunulmuştur.

### İnsan Dijital İkizi Sisteminin Bilgi Akış Şeması

Siber uzaydaki bir insan dijital ikizi, fiziksel alandaki gerçek kişiye yanıt vermektedir. Yaş, kilo, boy, EKG, kan basıncı, diyet, ruh hali vb. gibi her türlü veri, günümüzde yaygın olan çok sayıda IoT cihazı tarafından toplanmaktadır. Tüm verileri uzak bulut sunucusuna aktaran bir ağ Sink Center'a (genellikle akıllı bir telefona) iletilmektedir. Sink Center, bazen gerektiğinde Edge Computing'i de yürütebilmektedir (Martinez-Velazquez ve ark., 2019; Shengli, 2021; Tang ve ark., 2024; Wang ve ark., 2024). Literatürde, bireylerden gelen EKG ile başa çıkmak ve ardından kişinin koroner kalp hastalığı olup olmadığına karar vermek için tensör akışına dayalı bir derin öğrenme modeli oluşturulmuştur. Kişinin koroner hastalık riski taşıdığına inanılıyorsa, tedaviyi uygulamak için kişiye, ailesine ve en yakın acil hastaneye alarm

gönderilir (Martinez-Velazquez ve ark., 2019). Şekil 4, insan dijital ikizi sisteminin bilgi akış şemasını göstermektedir.

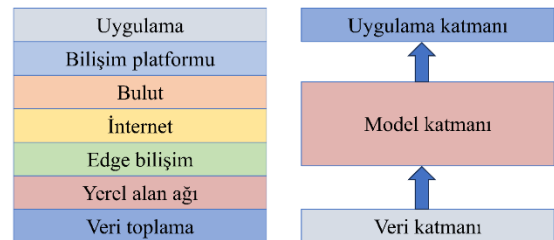


Şekil 4. İnsan dijital ikizi bilgi akış şeması

Kaynak: Shengli, W. (2021). Is human digital twin possible?. Computer Methods and Programs in Biomedicine Update, 1, 100014.

### İnsan Dijital İkizi Sistem Mimarisi

İnsan dijital ikizi genellikle uzak dağıtılmış bilgisayar sunucuları tarafından desteklenen bulutta (Azure, Baidu vb. gibi altyapı tedarikçileri tarafından sağlanan SaaS, PaaS veya IaaS Platformu) dağıtılmaktadır (Şekil 5). İnsan dijital ikizi, doğrudan kişiden gelen verileri elde etmenin yanı sıra, başta hastaneler olmak üzere diğer kaynaklardan da çeşitli biçimlerde veri elde etmektedir. Bu veriler dijital, analog, metin, şekil, görüntü, video, ses gibi önceden işlenmesi ve gerekirse normalleştirilmesi gereken birçok türde formda olabilmektedir. Veriler, analiz, matematik modelleme, hesaplama veya simülasyon için derin öğrenme algoritmalarına (örneğin CNN) girilmektedir. Sonrasında tahmin, öneri veya tanı için kişiye veya hastanelere verilmektedir (Shengli, 2021; Tang ve ark., 2024; Wang ve ark., 2024).



Şekil 5. İnsan dijital ikizi uygulama katmanı mimarisi

Veri Katmanı, giyilebilir akıllı cihazlardan kan basıncı, sıcaklık, EKG, ruh hali, hareket vb. verileri, akıllı telefonlardan yemek günlüğü, hobiler, diğer sosyal aktiviteler ve hastanelerden veya sağlık kuruluşlarından günlük kayıtlar, muayene, tedavi kayıtları vb. verileri toplamaktadır. Bu verilerin önceden işlenmesi, sonraki işlemler için akıllı cihazlarda işlenmesi gerekmektedir. İşlenmiş veriler, LAN' (yerel alan ağları), BAN (vücut alanı ağı), BlueTooth, WIFI vb. aracılığıyla bir Sink Center'da (bir akıllı telefon veya ağ geçidi) toplanmaktadır. Sink Center, bunları İnternet üzerinden uzak bulutta dağıtılan insan dijital ikizine aktarmaktadır. Bazen, belgenin sunduğu gibi gerekli olduğunda edge bilişime ihtiyaç duyulmaktadır (Martinez-Velazquez ve ark., 2019; Tang ve ark., 2024; Wang ve ark., 2024) Tüm veriler, insan dijital ikizinin çekirdeğini oluşturan birçok matematiksel modelin, temsilin ve bilgi işlem platformunun uygulama katmanına işlev arayüzü sağlamak için konuşlandırıldığı bulut veri tabanında saklanır. Uygulama Katmanı, kullanıcılara sağlık yönetimi, hastalık teşhisi, egzersiz önerisi, diyet önerisi vb. sağlamaktadır (Martinez-Velazquez ve ark., 2019; Shengli, 2021; Tang ve ark., 2024; Wang ve ark., 2024).

### Sağlık Hizmetlerinde Dijital İkiz Kullanımı

Sağlık hizmetlerinde çeşitli dijital ikiz teknolojileri kullanılmaktadır. Hastanın sağlığı, tedavisi ve bakımı ile ilgili hizmet maliyetlerinde azalma, kalitatif hizmetler, toplumsal aksaklıklarla ilgili konular vb. açısından hizmetlerde kullanılmaktadır. Bu hizmetler, hızlı iyileşme sağlamak için tedavi boyunca hastanın bakımındaki iyileşmeyi daha iyi yansıtmaktadır (Lutze, 2020; Madubuike & Anumba, 2021; Saarioluoma ve ark., 2021; Wu ve ark., 2021; Liu ve ark., 2022; Song ve Li, 2022; Tang ve ark., 2024; Wang ve ark., 2024).

Her sağlık kuruluşu, hasta deneyimlerini iyileştirmeye çalışırken aynı zamanda bakım sunumunun etkinliğini, verimini ve kalitesini artırmaya çalışmaktadır. İşlerin sorunsuz yürümesini sağlamak için tedavi alanları, ameliyathaneler, yoğun bakım ünitesi yatakları ve hasta odaları, düzenli olarak planlanması gereken sınırlı kaynaklardır. Elektronik sağlık kayıtlarından, hasta kayıtlarından ve diğer kaynaklardan elde edilen veriler, giyilebilir cihazlardan ve diğer kişisel sağlık cihazlarından alınan hasta verileriyle birleştirilebilmektedir. Bu veri setleriyle, her kişi doğru bir şekilde tasvir

edebilmekte ve çeşitli ilaçların etkilerini tahmin etmek, son derece kişiselleştirilmiş bakım planları geliştirmek ve bir hastanın hastalıklara veya diğer bozukluklara duyarlılığı hakkında erken uyarılar almak için simülasyonlar gerçekleştirebilmektedir (Ashima ve ark., 2021; Newrzella ve ark., 2021; Ogunseiju ve ark., 2021; Zhong ve ark., 2022).

### Sağlık Hizmetleri İçin Çeşitli Dijital İkiz Teknolojileri ve Araçları

Sağlık hizmetleri için dijital ikiz uygulaması ile ilgili çeşitli akıllı araçlar ve teknolojiler Tablo 1'de örneklendirilmiştir (Karakra ve ark., 2019; Barricelli ve ark., 2020; Botín-Sanabria ve ark., 2022; Hamzaoui ve ark., 2022).

**Tablo 1. Sağlık hizmetleri için çeşitli dijital ikiz teknolojileri ve araçları**

<b>Fiziksel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Algılama</li> <li>Ölçüm</li> <li>Malzemeler</li> <li>Dinamikler</li> </ul>
<b>Hizmetler</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Algoritmalar</li> <li>Yazılım</li> <li>Platformlar</li> <li>Mimarlık</li> </ul>
<b>Veri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Veri Toplama</li> <li>Depolama</li> <li>İşleme</li> <li>Füzyon</li> </ul>
<b>Veri toplama</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>API</li> <li>Web tarayıcıları</li> <li>Sensörler</li> </ul>
<b>Modeller</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simülasyon</li> <li>Görselleştirme</li> <li>Model geliştirme</li> </ul>
<b>Bağlantılar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>İnternet</li> <li>Arayüzler</li> <li>Güvenlik</li> </ul>
<b>Analiz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doğruluk</li> <li>Tolerans</li> <li>Kullanılabilirlik</li> </ul>
<b>Fiziksel hizmetler</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>İnsan bilgisayar etkileşimleri</li> <li>Arayüzler</li> </ul>

Dijital ikizlere gerçek dünya faktörleri dahil edildiğinden, kalite kontrol ve test için AI (DL ve ML) gereklidir. Dijital ikizler daha kapsamlı bir IoT ekosistemine bağlı olduğundan, tüm sensörler ve veri kaynakları kusursuz bir şekilde birlikte çalışmalıdır. Maksimum doğruluk ve minimum hata için, önemli veri testleri, birçok veri kaynağından canlı veri entegrasyonunun gerçek zamanlı olarak sorunsuz bir şekilde

gerçekleşmesini sağlar. IoT testi, çeşitli sensörlerin ve cihazların tam performansını ve elde edilen verilerin güvenliğini ve uyumluluğunu sağlamak için çok önemlidir (Kuo ve ark., 2021; Chen ve ark., 2021). Aerosol ile verilen kemoterapi ilaçları alan hastalar, tümör hedefleme tedavileri hedeflerine ulaşamadığında veya sağlıklı dokuya temas ettiğinde ciddi yan etkilere maruz kalma riskiyle karşı karşıyadır. Dijital bir ikiz kullanarak aerosol parçacıklarının bir yetişkinin üst solunum yolundan geçişini başarıyla simüle edilmektedir (Galli ve ark., 2019; Susila ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2022).

### Sağlık Hizmetlerinde Dijital İkiz Kullanım Alanları

Dijital ikizler, gerçek konumu tehlikeye atmadan yapılan değişikliklerin hastane performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için güvenli bir ortam sağlamak ve yardımcı olmak için hastaneleri tıbbi bir ortamda sanallaştırmaktadır. En iyi eylem planını seçmek ve yaklaşan sorunlara

hazırlanmak için, bir hastanenin dijital ikizi, operasyonel stratejiler, kapasite, personel ve bakım modelleriyle ilgili veriye dayalı tahminlere erişim sağlamaktadır. Dijital ikiz, kapasiteyi sürekli olarak izleyebilmektedir. Personel programlarını optimize edilebilmekte, hasta yatakları ve ameliyathaneler gibi kaynaklar tahsis edilebilmekte ve kaynaklar gerektiğinde hızlı bir şekilde dağıtılabilmektedir. Bu teknoloji, fiziksel nesnenin nasıl kullanıldığını izleyebilmekte ve gerektiğinde taklit edebilmektedir (Karakra ve ark., 2018; Corral-Acero ve ark., 2020; Kaur ve ark., 2020; Leser ve ark., 2020; Gao ve ark., 2021; Lektauers ve ark., 2021). Dijital İkiz, bulut ve AI yetenekleriyle etkili bir sağlık hizmeti aracına dönüşmektedir.

Sağlık hizmetlerinde dijital ikizin önemli kullanım alanları Tablo 2’de gösterilmiştir (Mazumder ve ark., 2019; Karakra ve ark., 2020; Kolekar ve ark., 2021; Răileanu ve ark., 2021; Warke ve ark., 2021; Kerbach ve ark., 2021; Ofosu ve ark., 2022; Shi ve ark., 2022; Son ve ark., 2022):

**Tablo 2. Sağlık hizmetlerinde dijital ikiz kullanım alanları**

Uygulama	Açıklama
Hasta bakımı	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bir bütün olarak insan vücudu ve kalp, akciğerler ve böbrekler gibi belirli organlar için dijital ikizlerin gelişimi ilerlemiştir. Herhangi bir kişinin organı taklit edilebilir. Hasta üzerinde uygulama yapılmadan önce dijital ikizle test yapılabilir.</li> <li>Nesneleri tanımak ve hareket ettirmek, oda dönüşlerini artırır, yatışları hızlandırır ve hasta sonuçlarını iyileştirir.</li> <li>Dijital ikizler daha ucuz görüntüleme teknolojisi, laboratuvar otomasyonu ve cerrahi robotlar dahil olmak üzere daha ucuz varlıkların performansını ve erişilebilirliğini artıran bakımı da mümkün kılar.</li> <li>Etkili kaynak yönetimi, hastane, kampüs veya halk sağlığı ağı düzeyinde geliştirilebilir.</li> <li>Sağlık hizmetlerinde en potansiyel dijital ikiz kullanıcıları kişiselleştirilmiş tedavi olabilir.</li> <li>Dijital ikiz çözümleri, nesnelerin hassas sanal temsillerini ve operasyonel süreç simülasyonlarını sunarak, çeşitli endüstrilerin inovasyon fırsatlarını ortaya çıkarmasına ve kurumsal operasyonları ve performansı artırmasına yardımcı olur.</li> </ul>
Klinik çalışmalar	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dijital ikizlerin kullanımı, klinik çalışmaların yönetilme şeklini değiştirebilir.</li> <li>Herkesi bilgilendirmek ve programa uygun tutmak için uyumu, iletişimi ve uyarılar ve hatırlatıcılar oluşturma yeteneğini geliştiren bir klinik araştırma katılımcısının ikizini oluşturmak mümkündür.</li> <li>Örneğin, Dijital İkiz, kontrol grubunu sanallaştırarak gerekli katılımcı sayısını azaltabilir. Sanal katılıma izin vermek ve deneme katılımcılarının coğrafi çeşitliliğini artırmak için IoT cihazlarını ve teletıp prosedürlerini dahil etmek, katılımın artmasına yardımcı olabilir.</li> <li>Hastanın Dijital İkizi, kişinin sayısız yaşamsal belirtisi, tıbbi durumu, tedaviye yanıtı ve çevresi hakkında sürekli bilgi toplamak için tasarlanmıştır.</li> <li>Makine öğrenimi algoritması, her hastanın önceki ve mevcut verilerinin gelecekteki sağlık sorunlarını tahmin etmesine yardımcı olur.</li> </ul>

Tablo 2'nin Devamı

Uygulama	Açıklama
Daha iyi kişisel sağlık sonuçları	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sağlık sektöründe artan bilgisayar ve algoritma gücü, teknolojinin hastaya özel bir dijital ikiz geliştirmesine olanak tanıyarak insan çeşitliliğine olanak tanır ve bireysel sağlık sonuçlarını iyileştirir. Dijital ikizin potansiyelini tam olarak gerçekleştirmek için, ek koordineli ve devam eden temel araştırma ve geliştirmeye ihtiyaç duyulacaktır.</li> <li>Dijital ikiz ile, gerçek fiziksel öge ile dijital temsili arasında otomatik veri akışı düşünülebilir.</li> <li>Sağlık personelleri, hastanın görüntüleme verileri, genetik bilgileri ve laboratuvar bulguları ile dijital bir ikiz kullanarak cerrahi, radyasyon tedavisi veya hormon tedavisinden en uygun tedaviyi seçebilir.</li> <li>Fizyolojik ve davranışsal verileri analiz eden Dijital İkiz, geniş bir popülasyonda kronik hastalıkları yönetmek için kronik hastalıkların erken teşhisine yardımcı olur.</li> <li>Karmaşık bir sistem, süreç veya konum, yapay zeka teknolojisindeki ilerlemeler kullanılarak artık tek bir öge veya bileşen yerine dijital bir ikiz ile temsil edilebilir. Bu tür bir simülasyon, uzun bekleme sürelerini azaltarak, acil durum hizmetlerini verimli bir şekilde yöneterek, laboratuvar ve tıbbi ekipman kullanımını ve personel ihtiyaçlarını en üst düzeye çıkararak ve cihaz arıza süresini en aza indirerek prosedürü optimize eder ve hasta deneyimini geliştirir.</li> <li>Hastane yöneticileri, hastalardan doktorlara, verilerden süreçlere kadar her şeyi tek bir platformdan takip edebilir.</li> </ul>
Hastane faaliyetlerinin iyileştirilmesi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dijital ikizler personelin, hastaların ve ekipmanın hareketi dahil olmak üzere çeşitli hastane operasyonlarını taklit eder.</li> <li>AI modeli, tüm hastane veri noktalarından elde edilen gerçek zamanlı verileri kullanarak artan verimliliği simüle edebilir.</li> <li>Model hem görüntüleme hem de görüntülemeye dayalı olmayan laboratuvar tanımlarının sonuçlarını toplayabilir ve karar vermeye yardımcı olmak için doktora sunabilir.</li> <li>Araştırmacılar, gerçek hayata benzer yerlerde veya koşullarda senaryoları denemeden önce, dijital ikizleri uygun maliyetli ve güvenli bir şekilde kullanarak test ederler.</li> <li>Araştırmacılar, hastalık modellerini tespit etmek, tedavilerin etkilerini modellemek ve canlı deneklerde daha fazla çalışma için en umut verici alanları belirlemek için dijital ikizleri kullanabilir.</li> </ul>
Tanı ve tıbbi eğitim	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dijital ikiz, gerçek bir ameliyattan önce geliştirilen bir hasta modeli olarak kullanılabilir. Multidisipliner bir ekip, insan anatomisine zarar vermemek için tıbbi eğitim ve teşhiste sanal cerrahi gerçekleştirebilir.</li> <li>Öğrenciler, bireylerin fizyolojik ve anatomik varyasyonları hakkında daha fazla bilgi edinmek için bu gerçek zamanlı modeli kullanarak hastalar üzerinde ameliyatı taklit edebilir.</li> <li>Doktorların ve araştırmacıların sağlık sektöründeki çeşitli diğer uygulamalar için kullanabilecekleri yüksek çözünürlüklü, hastalığa özgü tıbbi dijital ikizler oluşturmaya yardımcı olmanın yanı sıra, uzun vadeli semptomları anlamak için kullanılan aynı teknoloji, tıbbi dijital ikizlerin oluşturulmasına yardımcı olmak için de kullanılabilir.</li> </ul>
Sağlık hizmetleri tahmini	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dijital ikiz teknolojisi ile araştırmacılar, hastanın genetik yapısı, tıbbi geçmişi ve uzun vadeli etkileri hakkındaki bilgileri kullanarak milyonlarca kişiselleştirilmiş terapi simülasyonu çalıştırabilir. Bu, araştırmacıların gerçek hastaları tehlikeye atmadan en etkili tedavi yaklaşımını belirlemelerini sağlar.</li> <li>Hastaneler zorlaşan operasyonları optimize etmeyi, tehlikeleri yönetmeyi, kaynakları verimli bir şekilde dağıtmayı ve güvenliği sağlayabilir.</li> </ul>
Daha iyi klinik araştırma yöntemi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kullanıcılar, gerçek hayattaki insanların sağlığını tehlikeye atmadan daha iyi sorular sormak, daha iyi yanıtlar almak ve eyleme geçirilebilir içgörüler elde etmek için teknolojiyi kullanabilir.</li> <li>Daha fazla dijital ikiz, daha fazla veri anlamına gelir ve bu da daha fazla keşif ve daha iyi bakıma yol açar.</li> <li>Dijital ikiz AI güdümlü algoritmalar, bir kişinin davranışındaki veya yaşam tarzı seçimlerindeki düzensizlikleri belirleyebilmeli, çeşitli klinik olayları birbirine bağlayabilmeli, belirli bir ilaca verilen yanıtları ve tepkileri izleyebilmeli ve tüm bu verileri doğru bir şekilde yorumlayabilmelidir.</li> </ul>



**Tablo 2'nin Devamı**

Uygulama	Açıklama
En iyi tedaviyi belirlemesi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gerçek hayatta benzer hastaların kohortlarını bir araya getirmek zor veya maliyetli olacaktır.</li> <li>Uygun şekilde uygulandığında, sağlık sektöründeki dijital ikiz teknolojisi, doktorların en iyi tedavileri seçmesine, hasta sonuçlarını iyileştirmesine ve mümkün olduğunca verimli çalışmasına olanak tanıyarak hastane maliyetlerinden tasarruf sağlar.</li> <li>Dijital ikizlerin kullanılması, hastanelerin bir kullanıcının sensör bilgilerine dayalı olarak bildirimleri otomatik olarak başlatmasını sağlayabilir.</li> <li>Hasta akışı ve acil servis bekleme süreleri azaltılabilir, masraflar azaltılabilir ve hasta deneyimi iyileştirilebilir.</li> </ul>
Tıbbi inovasyonun geliştirilmesi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dijital ikiz sağlık profesyonellerine, hastalara göre bireysel uyarlanmış tedavi yaklaşımlarının etkinliğini optimize etmede yardımcı olabilir.</li> <li>Dijital ikizler, tıp uzmanlarının hayat kurtaran teknolojileri pazara daha hızlı, ucuz ve daha yüksek hasta güvenliği ile getirmelerine yardımcı olabilir.</li> <li>Dijital ikizler geliştirmek için bireysel ve demografik veriler bilgisayar tabanlı veya in silico modellere dahil edilir.</li> <li>İnsan fizyolojisinin bu sanal modelleri, bilim insanlarının hastalıklar, yeni tedaviler ve tıbbi ekipman hakkında daha fazla bilgi edinmelerine yardımcı olur.</li> <li>Bu teknoloji, genellikle geleneksel kronik hastalık programları tarafından kapsanmayan daha karmaşık zorlukların çözülmesini mümkün kılar.</li> </ul>
Araştırma ve geliştirme	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sağlık sektöründe, araştırma ve geliştirme için veri sağlayan modeller oluşturmak için dijital ikiz simülasyonları kullanılır.</li> <li>Biyofiziksel bir model kullanarak, sağlık hizmetlerinde dijital bir ikiz, bir hastanın verilerini izleyebilir ve inceleyebilir.</li> <li>Bir sağlık personeli, hastanın geçmiş ve şimdiki verilerini analiz ederek bir hastanın sağlık hizmetini uzaktan yönetirken en modern bakımı sağlayabilir.</li> </ul>
Risklerin belirlenmesi ve bildirilmesi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erken sağlık belirtileri gibi kritik hasta bilgileri dijital ikize dahil edilir.</li> <li>Riskleri değerlendirmek ve hastalara sağlıklı bir yaşam sürmekten kaçınmaları gereken riskli davranışlar konusunda tavsiyelerde bulunmak için erken sağlık göstergelerine ilişkin verileri içerir.</li> <li>Sağlık personelleri, AI teknolojisini kullanarak belirli hastalar için önleyici programların etkinliğini değerlendirir.</li> </ul>
Uzaktan hasta bakımı	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hastanın dijital ikizi yardımıyla hastalar uzaktan izlenebilirler.</li> <li>Veri toplama ve iyileştirme becerilerini sürekli geliştirirken, güvenilir bulgular üretmek için uyarlanabilir analitik ve algoritmalar kullanır.</li> <li>Akıllı giyilebilir cihazları kullanarak hastalar takip edilebilir.</li> <li>Bulut tabanlı dijital ikizden gelen gerçek zamanlı veriler, sensörlü daha küçük, daha rahat giyilebilir cihazlar aracılığıyla beslenebilir.</li> </ul>

### Sağlık Hizmetlerinde Dijital İkiz Kullanım Örnekleri

Dijital ikiz sadece Tablo 2'de belirtilen alanlarla sınırlı kalmamakta, sağlık alanında birçok uygulama alanı bulabilmektedir. Günümüzde teknoloji geliştirme ve büyük verinin uygulanmasıyla akıllı sağlık hizmetleri öne çıkmaktadır.

#### Kişiselleştirilmiş Tedavi Planları

Dijital ikizler, bireyin tüm tıbbi geçmişini, genetik özelliklerini ve yaşam tarzı verilerini kullanarak kişiye özel tedavi planları oluşturabilir. Örneğin, bir kanser hastasının dijital ikizi, tümörün nasıl gelişeceğini ve farklı tedavilere nasıl yanıt vereceğini simüle edebilir. Bu sayede doktorlar,

hastaya en uygun tedavi yöntemini seçebilirler (Kaul ve ark., 2023). Bagaria ve arkadaşları (2020) kişisel sağlık ve esenlik için dijital ikiz hakkındaki mevcut literatüre genel bir bakış sunmaktadır. El Saddik ve arkadaşları (2019a), insan sağlığını ve refahını teşvik etmek için Ecosystem-Dtwin adlı bir dijital ikiz sunmaktadır. Nebeker ve arkadaşları (2020) dijital sağlık araştırmalarında teknoloji seçimini desteklemek için bir karar verme kontrol listesi aracı geliştirilmiştir. Martinez-Velazquez ve arkadaşları (2019) tarafından Edge'de çalışacak şekilde tasarlanmış iskemik kalp hastalığı tespiti için bir Cardio Twin mimarisi sunulmaktadır.

## Cerrahi Simülasyonlar ve Planlama

Cerrahlar, dijital ikiz teknolojisini kullanarak ameliyat öncesi hastaların organlarının 3D modellerini oluşturabilir ve cerrahi işlemi simüle edebilir. Bu yöntem, riskleri minimize etmek ve cerrahların en iyi yaklaşımı seçmesine yardımcı olmak için kullanılmaktadır. Özellikle kalp cerrahisi gibi karmaşık operasyonlar için dijital ikizler çok değerlidir (Shu ve ark., 2023). Chakshu ve arkadaşları (2019) kafa titreşiminden karotis darlığının ciddiyetini tespit etmek için yarı aktif bir insan dijital ikiz modeli geliştirmişlerdir. Fang ve arkadaşları (2019), karaciğer hastalıklarının doğru tedavisine yardımcı olabileceği umuduyla, karaciğer cerrahisi ile ilgili dijital akıllı tanı ve tedavi teknolojisinde dijital ikiz en uygulamasını gözden geçirmektedir.

## Kronik Hastalık Yönetimi

Kronik hastalıklar (örneğin diyabet, hipertansiyon) yönetiminde dijital ikizler, bireyin sağlık verilerini (kan basıncı, kan şekeri seviyeleri vb.) sürekli izleyerek olası komplikasyonları önceden tahmin edebilir ve doktorlara erken uyarılar gönderebilir. Hastalar, bu sistem sayesinde hastalıklarını daha etkili bir şekilde yönetebilir (Mosquera-Lopez ve Jacobs, 2024; Tang ve ark., 2024). Yakovchenko ve arkadaşları (2019) hastanın kendi kendini yönetmesini teşvik etmek için cep telefonu metin mesajlaşmasında otomatik mesajlaşma sistemini oluşturmuşlardır. Nebeker ve arkadaşları (2019) sağlık verileri ve AI kullanarak dijital sağlık araştırmalarını ilerletmek için neler yapılması gerektiğini araştırmışlardır. Literatür, kablosuz teknoloji, sensörler, uygulamalar ve veriler kullanarak kardiyovasküler hastalıkların önlenmesi ve yönetimini tartışmaktadır (Wongvibulsin ve ark., 2019). Qureshi (2014), sağlık verilerinin depolanması, paylaşılması ve tahmine dayalı analizi için dijital bir ekosistemin bulut tabanlı mimarisi için bir çerçeveye önermektedir.

## Rehabilitasyon ve Fizik Tedavi

Dijital ikizler, rehabilitasyon sürecini takip etmek ve optimize etmek için kullanılabilir. Örneğin, bir hasta fizik tedavi sürecinde ilerlerken, dijital ikizi gerçek zamanlı olarak vücut hareketlerini ve kas aktivitesini analiz edebilir. Böylece fizyoterapistler hastanın performansını izleyip gerekli ayarlamaları yapabilirler (Chen ve ark., 2023; Falkowski ve ark., 2023).

## Yapay Zeka ile Erken Teşhis

Dijital ikizler, büyük veri ve yapay zeka algoritmaları kullanarak bireylerde hastalıkların erken teşhisi için kullanılabilir. Örneğin, kalp hastalığı riski olan bir bireyin dijital ikizi, kalp ritmi ve tansiyon gibi verileri analiz ederek potansiyel kalp krizi riskini önceden tespit edebilir. Bu sayede önleyici tedbirler alınabilir (Shengli, 2021; Dai ve ark., 2022).

## Tıbbi Cihaz ve İlaç Geliştirme

Dijital ikiz teknolojisi, yeni tıbbi cihazlar ve ilaçların geliştirilmesinde de büyük rol oynamaktadır. Araştırmacılar, insan fizyolojisinin dijital ikizlerini kullanarak ilaçların insan vücuduna etkilerini simüle edebilir ve ilaç geliştirme sürecini hızlandırabilir. Ayrıca tıbbi cihazların insan vücudunda nasıl çalışacağını test etmek için de dijital ikizler kullanılabilir (Bordukova ve ark., 2024). Palanica ve arkadaşları (2019) hastalara ilgi çekici görseller ve bireysel klinik bulgularının bir sanal gerçeklik (virtual reality- VR) simülasyonu sağlayabilen ve tıbbi bilginin daha etkili bir şekilde aktarılmasına ve tedavi bilgilerinin anlaşılmasına yardımcı bir VR teknolojisi olan Health Voyager'ı tanımlamaktadır.

## Akıllı Hastaneler ve Entegre Sağlık Sistemleri

Dijital ikiz teknolojisi, akıllı hastanelerde hastaların sağlık durumlarını izlemek ve hastane süreçlerini optimize etmek için kullanılır. Örneğin, bir hastanın dijital ikizi, hastanedeki çeşitli cihazlardan gelen verileri toplayarak tedavi sürecini izler ve doktorlara sürekli geri bildirim sağlar. Bu sistemler, hasta güvenliğini artırır ve sağlık hizmetlerinin verimliliğini yükseltir (Aluvalu ve ark., 2023; Han ve ark., 2023).

## Mental Sağlık ve Psikolojik Danışmanlık

Dijital ikizler, ruh sağlığı takibi ve müdahale süreçlerinde de kullanılmaktadır. Özellikle anksiyete veya depresyon gibi durumlarda, dijital ikizler bireyin duygusal ve psikolojik durumunu izleyerek olası krizleri öngörebilir. Bu sayede erken müdahale ile bireylerin ruh sağlığı korunabilir (Ferdousi ve ark., 2022; Vildjiounaite ve ark., 2023).

## Sağlık Hizmetlerinde Dijital İkiz Kullanımında Etik İkilemler

Dijital ikiz teknolojisinin sağlık hizmetlerinde kullanımı, büyük faydalar sunarken aynı zamanda çeşitli etik ikilemler de doğurmaktadır. Bu teknoloji, bireylerin sağlık verilerinin dijital

ortamda sürekli izlenmesi ve kullanılmasıyla ilişkili olduğundan, bazı temel etik sorular ortaya çıkar. Bu alanda karşılaşılan başlıca etik ikilemler şu şekildedir (Braun, 2021; Braun & Krutzinna, 2022; Popa ve ark., 2021; Huang ve ark., 2021; Drummond & Coulet, 2022; Iqbal ve ark., 2022; Helbing ve ark., 2023):

**Mahremiyet ve Veri Güvenliği:** Dijital ikizler, bireylerin hassas sağlık verilerini toplar ve analiz eder. Bu verilerin siber saldırılara maruz kalma riski, büyük bir mahremiyet sorunu yaratır. Kişisel sağlık bilgilerinin yanlış ellere geçmesi, hastaların sosyal, ekonomik veya psikolojik olarak zarar görmesine yol açabilir. Ayrıca, veri ihlallerinin sonuçları sağlık sigortası şirketleri veya işverenler tarafından suistimal edilebilir.

**Etik İkilem:** Kişisel sağlık verilerinin güvenliği nasıl tam anlamıyla sağlanabilir ve bireylerin mahremiyet hakları korunabilir mi?

**Veri Sahipliği ve Kontrol:** Dijital ikizlerde toplanan veriler genellikle hastaneler, sağlık kuruluşları veya teknoloji firmaları tarafından yönetilir. Ancak bu verilerin kime ait olduğu sorusu hala tartışmalıdır. Bireyler, kendi dijital ikizleri üzerinde tam kontrole sahip olmalı mı, yoksa bu kontrol, verileri yöneten kurumlarla mı paylaşılmalı?

**Etik İkilem:** Dijital ikiz verilerinin sahibi kim olmalı? Birey mi yoksa bu verileri toplayan ve işleyen kurumlar mı?

**Bilgilendirilmiş Onam:** Dijital ikiz teknolojisinin kullanımı, bireylerden sürekli veri toplanmasını gerektirir. Ancak birçok insan, toplanan verilerin kapsamını ve nasıl kullanılacağını tam olarak anlamadan bu teknolojiyi kullanmayı kabul edebilir. Bilgilendirilmiş onamın tam anlamıyla sağlanması, teknolojinin karmaşıklığı nedeniyle zor olabilir.

**Etik İkilem:** Dijital ikiz verilerinin toplanması ve kullanılması konusunda bireyler yeterince bilgilendiriliyor mu? Onam süreci gerçekten anlamlı mı?

**Veri İkincil Kullanım:** Toplanan sağlık verileri genellikle araştırma veya ticari amaçlarla tekrar kullanılabilir. Bu, sağlık hizmetlerini geliştirebilir, ancak hastaların onayı olmadan yapılan veri kullanımları etik sorunlara neden olabilir. Özellikle bireylerin sağlık verilerinin ticari amaçlarla kullanılması, onların mahremiyet haklarını ihlal edebilir.

**Etik İkilem:** Sağlık verilerinin araştırma veya ticari amaçlarla tekrar kullanımı etik mi, yoksa hastaların bu süreç üzerindeki kontrolü sınırlı mı?

**Eşit Olmayan Erişim:** Dijital ikiz teknolojisine erişim, maliyetler veya teknolojiye erişim sorunları nedeniyle her birey için mümkün olmayabilir. Bu durum, sağlık hizmetlerinde eşitsizlikleri artırabilir ve dijital ikize sahip olanlarla olmayanlar arasında sağlık sonuçlarında farklar yaratabilir.

**Etik İkilem:** Dijital ikiz teknolojisine erişim herkes için eşit mi? Bu teknoloji, sağlık hizmetlerinde yeni bir eşitsizlik boyutu mu yaratıyor?

**Kişisel Özerklik ve Müdahale:** Dijital ikizler, bireylerin sağlık durumlarını sürekli izleyip tahminler ve öneriler sunabilir. Ancak bu süreç, bireylerin yaşamlarına ve sağlık kararlarına dışarıdan müdahale anlamına gelebilir. Özellikle acil durumlar veya sağlık önerileri konusunda dijital ikizlerin sunduğu otomatik kararlar, bireylerin kendi özerklik haklarını ihlal edebilir.

**Etik İkilem:** Dijital ikiz teknolojisinin sunduğu sağlık önerileri ve otomatik müdahaleler, bireylerin karar verme özgürlüğünü kısıtlar mı?

**Yanlış veya Yetersiz Veri ile Tam Hataları:** Dijital ikizler, toplanan verilere dayalı teşhisler ve tedavi önerileri sunar. Ancak bu veriler eksik veya yanlış olursa, yanlış teşhisler veya tedavi hataları meydana gelebilir. Bu durum, bireylerin sağlıklarını tehlikeye atabilir ve güvenilirliği sorgulanabilir hale gelir.

**Etik İkilem:** Dijital ikizler tarafından toplanan verilerin doğruluğunu nasıl garanti edebiliriz? Yanlış veri ile yapılan teşhisler ve tedavi hataları nasıl önlenebilir?

**Yapay Zeka ve Otonom Karar Verme:** Dijital ikizler, yapay zeka ve makine öğrenimi algoritmaları kullanarak bireylerin sağlık durumlarını analiz eder ve kararlar verir. Ancak bu algoritmalar, insan müdahalesi olmadan kararlar alırken etik kaygılar doğurabilir. Yapay zekanın verdiği kararlar her zaman şeffaf olmayabilir ve algoritmaların yanlılık taşıması olasılığı bulunur.

**Etik İkilem:** Yapay zeka tarafından yapılan analiz ve teşhislerin şeffaflığı nasıl sağlanabilir? Otonom kararlar, insan denetimi olmadan etik mi?

**Gelecek Nesillere Etkisi:** Dijital ikizlerin, bireylerin genetik bilgilerini de içermesi, gelecek nesillerin sağlık verilerinin dijital ortamda depolanması anlamına gelebilir. Bu durum,

gelecekte doğacak bireylerin bile sağlık verilerinin kontrol edilip edilmediği sorusunu gündeme getirir. Ayrıca genetik bilgiler üzerinden yapılan analizler, etik olarak genetik ayrımcılık riski taşır.

**Etik İkilem:** Gelecek nesillerin sağlık verilerinin kontrolü kimde olmalı? Dijital ikizler, genetik ayrımcılığı artırabilir mi?

Dijital ikiz teknolojisinin sağlık hizmetlerinde uygulanması, bu etik sorunların dikkatlice ele alınmasını ve çözümler üretilmesini gerektirir. Verilerin güvenliği, bireylerin özerkliği ve eşit erişim gibi konular, bu teknolojinin geniş çapta benimsenmesi ve etik açıdan kabul edilebilirliği için kritik öneme sahiptir.

### Dijital İkizlerin Hemşirelik Mesleğine Katkısı

Dijital ikizler, bireylerin genetik, biyolojik, çevresel ve davranışsal verilerini kullanarak sanal bir kopyalarını oluşturur. Bu sayede hemşireler, her hasta için özelleştirilmiş bakım planları oluşturabilir ve hastaların kişisel sağlık durumlarını daha iyi anlayabilir. Dijital ikizler, hastaların sağlık durumlarını gerçek zamanlı olarak izleyebilir ve anomalileri erkenden tespit edebilir. Bu, hemşirelerin hastalıkların erken evrelerinde müdahale etmelerini sağlar ve komplikasyon riskini azaltır (Jiang ve ark., 2022; Kaul ve ark., 2023).

Dijital ikizler, hasta bakımında en iyi kararları verebilmek için büyük miktarda veriyi analiz ederek hemşirelere klinik karar destek sistemi sunar. Hemşireler, bu verilere dayanarak daha bilinçli ve güvenilir kararlar alabilir. Dijital ikizler, farklı bakım stratejilerinin simülasyonlarını yaparak hastalar üzerinde hangi tedavi yöntemlerinin en etkili olacağını tahmin edebilir. Hemşireler bu simülasyonlara dayanarak, tedavi ve bakım planlarını optimize edebilir (Shengli, 2021; Dai ve ark., 2022; Sun ve ark., 2023).

Dijital ikizler, hastaların bakım süreçlerinde veri girişlerini otomatikleştirerek ve izleme süreçlerini dijital olarak yöneterek hemşirelerin iş yükünü hafifletebilir. Bu sayede hemşireler, hastalara ayırabilecekleri daha fazla zamana sahip olur. Hastaların vital bulgularını izleme, ilaç takibini yapma gibi rutin görevlerde dijital ikizler büyük kolaylık sağlar. Hemşireler, manuel işlemler yerine dijital ikizlerin yardımıyla daha stratejik işlere odaklanabilir (Elayan ve ark., 2021; Jiang ve ark., 2022; Sun ve ark., 2023).

Hemşirelik eğitimi sırasında dijital ikizler, öğrencilere sanal hastalar üzerinde pratik yapma imkânı sunar. Öğrenciler, gerçek hayattaki senaryoları simüle edebilir ve hasta bakımında karşılaşılabilecekleri durumlar için daha iyi hazırlanabilirler. Dijital ikizler, çeşitli klinik durumların risk analizlerini yaparak, hemşirelerin kritik kararları daha iyi anlamalarına ve acil durumlarda nasıl hareket edeceklerini öğrenmelerine yardımcı olabilir (Sun ve ark., 2023; She ve ark., 2023).

Dijital ikizler, kronik hastalıkların yönetiminde, hastaların uzun vadeli sağlık durumlarını takip etmek için kullanılabilir. Hemşireler, bu hastaların sağlık verilerini sürekli izleyerek, anormal durumları erkenden tespit edebilir ve hızlı müdahalede bulunabilir. Özellikle evde bakım hizmetlerinde, dijital ikizler hastaların durumlarını uzaktan izleyebilir ve hemşirelere anında geri bildirim sağlayabilir. Bu, hemşirelerin evde bakıma ihtiyaç duyan hastalar için daha güvenli ve etkili hizmet sunmasını sağlar (Elayan ve ark., 2021; Jiang ve ark., 2022; Sun ve ark., 2023; Mosquera-Lopez & Jacobs, 2024; Tang ve ark., 2024).

Dijital ikizler kullanılırken, hemşireler veri gizliliği ve hasta hakları konusundaki farkındalığını artırabilir. Dijital ikizlerin güvenli kullanımı, hemşirelerin hastaların verilerinin korunmasını sağlama konusunda daha dikkatli olmalarını gerektirir (Braun, 2021; Braun & Krutzinna, 2022; Popa ve ark., 2021; Huang ve ark., 2021; Drummond & Coulet, 2022; Iqbal ve ark., 2022; Helbing ve ark., 2023). Bu bağlamda, dijital ikizler etik karar süreçlerinde hemşireler için kritik bir rol oynar.

### SONUÇ

Sağlık sektörü hızla dijital çağa dönüşmektedir. Hastalar artık sadece pasif sağlık hizmeti alıcıları olmaktan ziyade aktif olarak değer aramaktadırlar. Dijital ikiz teknolojisi, bireysel sağlığın korunması ve iyileştirilmesi için yararlı bir uygulama olabilir.

İnsanlar, herhangi bir makineden veya üretim sisteminden daha karmaşık sistemlerdir. İnsanın tüm yaşam döngüsü yönetimi için bu çok daha zordur. Dijital ikiz bu tür sorunları çözmek için ideal bir yol olabilir. İnsan dijital ikizinin inşası zor iş olsa da bilgi işlem kapasitesinin hızlı bir şekilde teşvik edilmesi, yüksek performanslı ve ucuz akıllı cihazlar, büyük veri depolama, uygun veri toplama, AI'nın geliştirilmesi, dijital ikiz

etkinleştirme teknolojisi insan dijital ikizinin parlak bir geleceğidir. Teknoloji gelişimi ile insan dijital ikizinin kullanılması daha da yakın görünmektedir. Yine de insanın karmaşıklığı, modellemenin zorluğu, büyük veri füzyon analizi, veri kaynaklarının çeşitliliği, veri değişkenliği ve heterojenliği gibi bazı zorluklar nedeniyle kat etmesi gereken uzun bir yol olduğu aşikardır.

Dijital ikiz teknolojisi, hemşirelik mesleğini daha verimli, kişiselleştirilmiş ve hasta odaklı bir hale getirirken, hemşirelerin daha etkin bir bakım sunmasını sağlar. Bununla birlikte, hemşirelerin dijital ikizlerin kullanımına dair gerekli eğitim ve altyapıya sahip olması da önemlidir.

Tüm bunların yanında sağlık hizmetleri, sadece dijital araçlar veya yapay zeka destekli sistemler üzerine kurulu değildir. Bu hizmetler, biyolojik, psikolojik, sosyal ve çevresel faktörlerin tamamını kapsayan bütüncül bir yaklaşımla sunulmaktadır. Hemşireler, hekimler ve diğer sağlık profesyonelleri, insan etkileşimini ve empatiyi dijital sistemlerin sağlayamayacağı bir biçimde hastalara sunmaktadır. Dijital ikiz gibi uygulamalar, klinik karar destek sistemleri olarak hizmet etse de nihai kararlar ve bakım sunumu insan faktörü ile gerçekleşmektedir. Dijital ikiz uygulamaları, sağlık hizmetlerinin bir parçası olarak görülmeli, fakat anahtar karar mekanizmaları halen insan merkezli olarak yürütülmelidir. Dijital ikizler; hastanın durumu, tıbbi geçmişi ve bireysel ihtiyaçlarını hesaba katarak sağlık uzmanlarına önemli veriler sunabilmektedir. Yapay zeka destekli sistemlerin sunduğu analizler ve öneriler, sağlık profesyonellerinin kararlarını desteklemektedir. Ancak bu sistemler, sağlık uzmanlığının yerini almak yerine onu tamamlar niteliktedir.

Dijital sağlık teknolojileri, erişim ve eşitsizlik sorunlarını da beraberinde getirebilmektedir. Kırsal bölgelerdeki hastalar veya dijital teknolojilere erişimi olmayan bireyler, bu sistemlerden faydalanamayabilir. Bu nedenle sağlık hizmetlerinin dijitalleşmesinde sosyal ve organizasyonel düzenlemeler göz önünde bulundurulmalıdır. Dijital ikiz uygulamaları gibi teknolojiler, hastaların sağlık süreçlerine daha fazla katılmalarını teşvik edebilir. Ancak, hastaların bu sistemleri anlaması ve kullanabilmesi için eğitim ve rehberlik gereklidir.

Dijital ikiz sistemlerinin kullanımında hasta verilerinin gizliliği ve güvenliği büyük önem taşır. Bu bağlamda, yapay zeka sistemleri sadece teknik açıdan değil, etik açıdan da düzenlemelere tabi

olmalıdır. Yapay zeka destekli dijital sistemlerin hatalı sonuçlar vermesi durumunda sorumluluk kimin üzerinde olacaktır? Bu soruların yanıtlanması, sağlık sistemlerinde dijital ikizlerin sürdürülebilir kullanımı için kritik bir öneme sahiptir.

Dijital ikizler ve yapay zeka destekli sistemler, sağlık hizmetlerinin kalitesini ve etkinliğini artırabilir. Ancak bu teknolojilerin sağlık profesyonelleri, organizasyonel yapılar ve hastalarla birlikte, dengeli bir şekilde uygulanması gerekir. Teknoloji ve insan iş birliği, sağlık hizmetlerinin geleceğinde merkezde olmalıdır.

#### Yazar Katkısı / Author Contributions

Fikir/Kavram: G.Ö., G.M.; Tasarım: G.Ö., G.M.; Denetleme/Danışmanlık: G.Ö., G.M.; Analiz ve/veya Yorum: G.Ö., G.M.; Kaynak Taraması: G.Ö., G.M.; Makalenin Yazımı: G.Ö., G.M.; Eleştirel İnceleme: G.Ö., G.M.

#### Hakem Değerlendirmesi / Peer-review

Dış bağımsız

#### Çıkar Çatışması / Conflict of Interest

Yazarlar araştırmanın yürütülmesinde herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmişlerdir.

#### Finansal Destek / Financial Disclosure

Yazarlar araştırmanın yürütülmesi sürecinde bir finansal destek almadıklarını beyan etmiştir.

#### KAYNAKLAR

- Alam, K. M., El Saddik, A. (2017). C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. *IEEE Access*, 5, 2050-2062. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2657006
- Aluvalu, R., Mudrakola, S., Kaladevi, A. C., Sandhya, M. V. S., Bhat, C. R. (2023). The novel emergency hospital services for patients using digital twins. *Microprocessors and Microsystems*, 98, 104794.
- Ashima, R., Haleem, A., Bahl, S., Javaid, M., Mahla, S. K., Singh, S. (2021). Automation and manufacturing of smart materials in Additive Manufacturing technologies using Internet of Things towards the adoption of Industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5081-5088. doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.583
- Bagaria, N., Laamarti, F., Badawi, H. F., Albraikan, A., Martinez Velazquez, R. A., El Saddik, A. (2020). Health 4.0: Digital twins for health and well-being. *Connected Health in Smart Cities*, 143-152. doi: 10.1007/978-3-030-27844-1\_7
- Barricelli, B. R., Casiraghi, E., Gliozzo, J., Petrini, A., Valtolina, S. (2020). Human digital twin for fitness management. *IEEE Access*, 8, 26637-26664. doi:

- 10.1109/ACCESS.2020.2971576
- Bomström, H., Annanperä, E., Kelanti, M., Xu, Y., Mäkelä, S. M., Immonen, M., ... Päivärinta, T. (2022). Digital twins about humans—design objectives from three projects. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 22(5), 050907. Doi: 10.1115/1.4054270
- Bordukova, M., Makarov, N., Rodriguez-Esteban, R., Schmich, F., Menden, M. P. (2024). Generative artificial intelligence empowers digital twins in drug discovery and clinical trials. *Expert Opinion on Drug Discovery*, 19(1), 33-42. doi: 10.1080/17460441.2023.2273839
- Botín-Sanabria, D. M., Mihaita, A. S., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A., Lozoya-Santos, J. D. J. (2022). Digital twin technology challenges and applications: A comprehensive review. *Remote Sensing*, 14(6), 1335. doi: 10.3390/rs14061335
- Braun, M. (2021). Represent me: please! Towards an ethics of digital twins in medicine. *Journal of Medical Ethics*, 47(6), 394-400. doi: 10.1136/medethics-2020-106134
- Braun, M., Krutzinna, J. (2022). Digital twins and the ethics of health decision-making concerning children. *Patterns*, 3(4). doi: 10.1016/j.patter.2022.100469
- Chakshu, N. K., Carson, J., Sazonov, I., Nithiarasu, P. (2019). A semi-active human digital twin model for detecting severity of carotid stenoses from head vibration—A coupled computational mechanics and computer vision method. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 35(5), e3180. doi: 10.1002/cnm.3180
- Chen, D., Wang, D., Zhu, Y., Han, Z. (2021). Digital twin for federated analytics using a Bayesian approach. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(22), 16301-16312. doi: 10.1109/JIOT.2021.3098692
- Chen, Y., Wang, W., Diao, J., Wang, D., Jian, Z., Wang, Y., Jiang, Z. (2023). Digital-Twin-Based Patient Evaluation during Stroke Rehabilitation. In *Proceedings of the ACM/IEEE 14th International Conference on Cyber-Physical Systems (with CPS-IoT Week 2023)* (pp. 22-33). doi: 10.1145/3576841.358592
- Corral-Acero, J., Margara, F., Marciniak, M., Rodero, C., Loncaric, F., Feng, Y., ... Lamata, P. (2020). The 'Digital Twin' to enable the vision of precision cardiology. *European Heart Journal*, 41(48), 4556-4564. doi: 10.1093/eurheartj/ehaa159
- Cunbo, Z., Jianhua, L., Hui, X., Xiaoyu, D., Shaoli, L., Gang, W. (2017). Connotation, architecture and trends of product digital twin. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 23(4), 753-768. doi: 0.13196/j.cims.2017.04.010
- Dai, Y., Wang, J., Gao, S. (2022). Advanced electronics and artificial intelligence: must-have technologies toward human body digital twins. *Advanced Intelligent Systems*, 4(7), 2100263. doi: 10.1002/aisy.202100263
- Drummond, D., Coulet, A. (2022). Technical, ethical, legal, and societal challenges with digital twin systems for the management of chronic diseases in children and young people. *Journal of Medical Internet Research*, 24(10), e39698. doi: 10.2196/39698
- El Saddik, A., Badawi, H., Velazquez, R. A. M., Laamarti, F., Diaz, R. G., Bagaria, N., Arteaga-Falconi, J. S. (2019a). Dtwins: A digital twins ecosystem for health and well-being. *IEEE COMSOC MMTTC Commun. Front*, 14(2), 39-43.
- El Saddik, A., Hossain, M. S., Kantarci, B. (Eds.). (2019b). *Connected health in smart cities*. Springer Nature. doi: 10.1007/978-3-030-27844-1
- Elayan, H., Aloqaily, M., Guizani, M. (2021). Digital twin for intelligent context-aware IoT healthcare systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(23), 16749-16757. doi: 10.1109/JIOT.2021.3051158
- Erol, T., Mendi, A. F., Doğan, D. (2020). The digital twin revolution in healthcare. In *2020 4th international symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT)* (pp. 1-7). IEEE. doi: 10.1109/ISMSIT50672.2020.9255249
- Falkowski, P., Osiak, T., Wilk, J., Prokopiuk, N., Leczkowski, B., Pilat, Z., Rzymkowski, C. (2023). Study on the applicability of digital twins for home remote motor rehabilitation. *Sensors*, 23(2), 911. doi: 10.3390/s23020911
- Fang, C., Zhang, P., Qi, X. (2019). Digital and intelligent liver surgery in the new era: Prospects and dilemmas. *EBioMedicine*, 41, 693-701. doi: 10.1016/j.ebiom.2019.02.017
- Ferdousi, R., Laamarti, F., Hossain, M. A., Yang, C., El Saddik, A. (2022). Digital twins for well-being: an overview. *Digital Twin*, 1, 7. doi: 10.12688/digitaltwin.17475.2
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952-108971. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358
- Galli, G., Patrone, C., Bellam, A. C., Annapareddy, N. R., Revetria, R. (2019). Improving process using digital twin: a methodology for the automatic creation of models. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*.
- Gao, C., Park, H., Easwaran, A. (2021, May). An anomaly detection framework for digital twin

- driven cyber-physical systems. In *Proceedings of the ACM/IEEE 12th International Conference on Cyber-Physical Systems* (pp. 44-54). doi: 10.1145/3450267.3450533
- Grieves, M. (2006). Product lifecycle management: driving the next generation of lean thinking. *McGraw Hill, New York, N. Y., USA*.
- Grieves, M. W. (2005). Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*, 2(1-2), 71-84. doi: 10.1504/IJPD.2005.006669
- Haleem, A., Javaid, M., Singh, R. P., Suman, R. (2022). Medical 4.0 technologies for healthcare: Features, capabilities, and applications. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 2, 12-30. doi: 10.1016/j.iotcps.2022.04.001
- Haleem, A., Javaid, M., Singh, R. P., Suman, R. (2023). Exploring the revolution in healthcare systems through the applications of digital twin technology. *Biomedical Technology*, 4, 28-38. doi: 10.1016/j.bmt.2023.02.001
- Hamzaoui, M. A., Julien, N. (2022). Social Cyber-Physical Systems and Digital Twins Networks: A perspective about the future digital twin ecosystems. *IFAC-PapersOnLine*, 55(8), 31-36. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.08.006
- Han, Y., Li, Y., Li, Y., Yang, B., Cao, L. (2023). Digital twinning for smart hospital operations: Framework and proof of concept. *Technology in Society*, 74, 102317. doi: 10.1016/j.techsoc.2023.102317
- Hassani, H., Huang, X., MacFeely, S. (2022). Impactful digital twin in the healthcare revolution. *Big Data and Cognitive Computing*, 6(3), 83. doi: 10.3390/bdcc6030083
- Helbing, D., Sánchez-Vaquerizo, J. A. (2023). Digital twins: potentials, ethical issues and limitations. In *Handbook on the politics and governance of Big Data and Artificial Intelligence* (pp. 64-104). Edward Elgar Publishing. doi: 10.4337/9781800887374.00013
- Huang, P. H., Kim, K. H., Schermer, M. (2022). Ethical issues of digital twins for personalized health care service: preliminary mapping study. *Journal of Medical Internet Research*, 24(1), e33081. doi: 10.2196/33081
- Iqbal, J. D., Krauthammer, M., Biller-Andorno, N. (2022). The use and ethics of digital twins in medicine. *Journal of Law, Medicine & Ethics*, 50(3), 583-596. doi: 10.1017/jme.2022.97
- James, L. (2021). Digital twins will revolutionise healthcare: Digital twin technology has the potential to transform healthcare in a variety of ways—improving the diagnosis and treatment of patients, streamlining preventative care and facilitating new approaches for hospital planning. *Engineering & Technology*, 16(2), 50-53. doi: 10.1049/et.2021.0210
- Jiang, J., Li, Q., Yang, F. (2022). [Retracted] TCM Physical Health Management Training and Nursing Effect Evaluation Based on Digital Twin. *Scientific Programming*, 2022(1), 3907481. doi: 10.1155/2022/3907481
- Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E., & Lamothe, J. (2019). HospiT'Win: a predictive simulation-based digital twin for patients pathways in hospital. In *2019 IEEE EMBS international conference on biomedical & health informatics (BHI)* (pp. 1-4). IEEE. doi: 10.1109/BHI.2019.8834534
- Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E., Lamothe, J., Taweel, A. (2018). Pervasive computing integrated discrete event simulation for a hospital digital twin. In *2018 IEEE/ACS 15th international conference on computer systems and Applications (AICCSA)* (pp. 1-6). IEEE.
- Karakra, A., Lamine, E., Fontanili, F., Lamothe, J. (2020). HospiT'Win: a digital twin framework for patients' pathways real-time monitoring and hospital organizational resilience capacity enhancement. In *9th International Workshop on Innovative Simulation for Health Care, IWISH* (Vol. 20202020, pp. 62-71). doi: 10.1109/AICCSA.2018.8612796
- Kaul, R., Ossai, C., Forkan, A. R. M., Jayaraman, P. P., Zelcer, J., Vaughan, S., Wickramasinghe, N. (2023). The role of AI for developing digital twins in healthcare: The case of cancer care. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 13(1), e1480. doi: 10.1002/widm.1480
- Kaur, M. J., Mishra, V. P., Maheshwari, P. (2020). The convergence of digital twin, IoT, and machine learning: transforming data into action. *Digital twin technologies and smart cities*, 3-17. doi: 10.1007/978-3-030-18732-3\_1
- Khan, S., Arslan, T., Ratnarajah, T. (2022). Digital twin perspective of fourth industrial and healthcare revolution. *IEEE Access*, 10, 25732-25754. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3156062
- Kolekar, S. S., Yeom, S., Choi, C., Kim, K. (2021). Web based Microservice Framework for Survival Analysis of Lung Cancer Patient using Digital Twin. In *Proceedings of the Korea Information Processing Society Conference* (pp. 537-540). Korea Information Processing Society. doi: 10.3745/PKIPS.y2021m11a.537
- Kuo, Y. H., Pilati, F., Qu, T., Huang, G. Q. (2021). Digital twin-enabled smart industrial systems: Recent developments and future perspectives. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(7-8), 685-689. doi: 10.1080/0951192X.2021.1959710

- Lektauers, A., Pecerska, J., Bolsakovs, V., Romanovs, A., Grabis, J., Teilans, A. (2021). A multi-model approach for simulation-based digital twin in resilient services. *WSEAS Trans. Syst. Control*, 16, 133-145. doi: 10.37394/23203.2021.16.10
- Leser, P. E., Warner, J. E., Leser, W. P., Bomarito, G. F., Newman, J. A., Hochhalter, J. D. (2020). A digital twin feasibility study (Part II): Non-deterministic predictions of fatigue life using in-situ diagnostics and prognostics. *Engineering Fracture Mechanics*, 229, 106903. doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.106903
- Liu, Y. K., Ong, S. K., Nee, A. Y. C. (2022). State-of-the-art survey on digital twin implementations. *Advances in Manufacturing*, 10(1), 1-23. doi: 10.1007/s40436-021-00375-w
- Liu, Y., Zhang, L., Yang, Y., Zhou, L., Ren, L., Wang, F., ... & Deen, M. J. (2019). A novel cloud-based framework for the elderly healthcare services using digital twin. *IEEE Access*, 7, 49088-49101. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909828
- Lutze, R. (2020). Digital twin based software design in eHealth-a new development approach for health/medical software products. In *2020 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* (pp. 1-9). IEEE. doi: 10.1109/ICE/ITMC49519.2020.9198546
- Madubuike, O. C., Anumba, C. J. (2021). Digital twin application in healthcare facilities management. In *Computing in Civil Engineering 2021* (pp. 366-373).
- Martinez-Velazquez, R., Gamez, R., El Saddik, A. (2019). Cardio Twin: A Digital Twin of the human heart running on the edge. In *2019 IEEE international symposium on medical measurements and applications (MeMeA)* (pp. 1-6). IEEE. doi: 10.1109/MeMeA.2019.8802162
- Mazumder, O., Roy, D., Bhattacharya, S., Sinha, A., Pal, A. (2019, July). Synthetic ppg generation from haemodynamic model with baroreflex autoregulation: a digital twin of cardiovascular system. In *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (pp. 5024-5029). IEEE. doi: 10.1109/EMBC.2019.8856691
- Miller, M. E., Spatz, E. (2022). A unified view of a human digital twin. *Human-Intelligent Systems Integration*, 4(1), 23-33. doi: 10.1007/s42454-022-00041-x
- Mosquera-Lopez, C., & Jacobs, P. G. (2024). Digital twins and artificial intelligence in metabolic disease research. *Trends in Endocrinology & Metabolism*, 35(6), 549-557. doi: 10.1016/j.tem.2024.04.019
- Nebeker, C., Bartlett Ellis, R. J., Torous, J. (2020). Development of a decision-making checklist tool to support technology selection in digital health research. *Translational behavioral medicine*, 10(4), 1004-1015. doi: 10.1093/tbm/ibz074
- Nebeker, C., Torous, J., Bartlett Ellis, R. J. (2019). Building the case for actionable ethics in digital health research supported by artificial intelligence. *BMC medicine*, 17(1), 1-7. doi: 10.1186/s12916-019-1377-7
- Newrzella, S. R., Franklin, D. W., Haider, S. (2021). 5-dimension cross-industry digital twin applications model and analysis of digital twin classification terms and models. *IEEE Access*, 9, 131306-131321. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115055
- Ofosu, R., Hosseinian-Far, A., Sarwar, D. (2022). Digital twin technologies, architecture, and applications: a comprehensive systematic review and bibliometric analysis. *Blockchain and Other Emerging Technologies for Digital Business Strategies*, 105-142. doi: 10.1007/978-3-030-98225-6\_5
- Ogunseju, O. R., Olayiwola, J., Akanmu, A. A., Nnaji, C. (2021). Digital twin-driven framework for improving self-management of ergonomic risks. *Smart and Sustainable Built Environment*, 10(3), 403-419. doi: 10.1108/SASBE-03-2021-0035
- Palanica, A., Docktor, M. J., Lee, A., Fossat, Y. (2019). Using mobile virtual reality to enhance medical comprehension and satisfaction in patients and their families. *Perspectives on medical education*, 8(2), 123-127. doi: 10.1007/s40037-019-0504-7
- Patrone, C., Galli, G., Revetria, R. (2019). A state of the art of digital twin and simulation supported by data mining in the healthcare sector. *Advancing Technology Industrialization Through Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques*, 605-615. doi: 10.3233/FAIA190084
- Popa, E. O., van Hilten, M., Oosterkamp, E., Bogaardt, M. J. (2021). The use of digital twins in healthcare: socio-ethical benefits and socio-ethical risks. *Life sciences, society and policy*, 17, 1-25. doi: 10.1186/s40504-021-00113-x
- Qureshi, B. (2014). Towards a digital ecosystem for predictive healthcare analytics. In *Proceedings of the 6th International Conference on Management of Emergent Digital EcoSystems* (pp. 34-41). doi: 10.1145/2668260.2668286
- Răileanu, S., Borangiu, T., Ivănescu, N., Morariu, O., Anton, F. (2020). Integrating the digital twin of a shop floor conveyor in the manufacturing control system. In *Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future: Proceedings of SOHOMA 2019 9* (pp. 134-145). Springer International Publishing. doi:



10.1007/978-3-030-27477-1\_10

- Rosen, R., Von Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K. D. (2015). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnline*, 48(3), 567-572.
- Saariluoma, P., Cañas, J., & Karvonen, A. (2021). Human digital twins and cognitive mimetic. In *Human Interaction, Emerging Technologies and Future Applications III: Proceedings of the 3rd International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies: Future Applications (IHET 2020), August 27-29, 2020, Paris, France* (pp. 97-102). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-55307-4\_15
- Sahal, R., Alsamhi, S. H., Brown, K. N. (2022). Personal digital twin: a close look into the present and a step towards the future of personalised healthcare industry. *Sensors*, 22(15), 5918. doi: 10.3390/s22155918
- She, M., Xiao, M., Zhao, Y. (2023). Technological implication of the digital twin approach on the intelligent education system. *International journal of humanoid robotics*, 20(02n03), 2250005. doi: 10.1142/S0219843622500050
- Shengli, W. (2021). Is human digital twin possible?. *Computer Methods and Programs in Biomedicine Update*, 1, 100014. doi: 10.1016/j.cmpbup.2021.100014
- Shi, Y., Deng, X., Tong, Y., Li, R., Zhang, Y., Ren, L., Si, W. (2022). Synergistic digital twin and holographic augmented-reality-guided percutaneous puncture of respiratory liver tumor. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 52(6), 1364-1374. doi: 10.1109/THMS.2022.3185089
- Shu, H., Liang, R., Li, Z., Goodridge, A., Zhang, X., Ding, H., ... Unberath, M. (2023). Twin-S: a digital twin for skull base surgery. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 18(6), 1077-1084.
- Son, S., Kwon, D., Lee, J., Yu, S., Jho, N. S., Park, Y. (2022). On the design of a privacy-preserving communication scheme for cloud-based digital twin environments using blockchain. *IEEE Access*, 10, 75365-75375. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3191414
- Song, Y., Li, Y. (2022). Digital twin aided healthcare facility management: a case study of shanghai tongji hospital. In *Construction Research Congress 2022* (pp. 1145-1155).
- Sun, T., He, X., Li, Z. (2023). Digital twin in healthcare: Recent updates and challenges. *Digital Health*, 9, 20552076221149651. doi: 10.1177/20552076221149651
- Susila, N., Sruthi, A., Usha, S. (2020). Impact of cloud security in digital twin. In *Advances in Computers* (Vol. 117, No. 1, pp. 247-263). Elsevier. doi: 10.1016/bs.adcom.2019.09.005
- Tang, C., Yi, W., Occhipinti, E., Dai, Y., Gao, S., Occhipinti, L. G. (2024). A roadmap for the development of human body digital twins. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 1(3), 199-207. doi: 10.1038/s44287-024-00025-w
- Tao, F., Liu, W., Zhang, M., Hu, T. L., Qi, Q., Zhang, H., ... Huang, Z. (2019). Five-dimension digital twin model and its ten applications. *Computer integrated manufacturing systems*, 25(1), 1-18. doi: 10.13196/j.cims.2019.01.001
- U.S. Government Accountability Office. (2023). Science & Tech Spotlight: Digital Twins—Virtual Models of People and Objects. <https://csiac.org/articles/digital-twins-virtual-models-of-people-and-objects/>
- Vildjiounaite, E., Kallio, J., Kantorovitch, J., Kinnula, A., Ferreira, S., Rodrigues, M. A., Rocha, N. (2023, July). Challenges of learning human digital twin: Case study of mental wellbeing: Using sensor data and machine learning to create HDT. In *Proceedings of the 16th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments* (pp. 574-583). doi: 10.1145/3594806.3596538
- Wang, B., Zhou, H., Li, X., Yang, G., Zheng, P., Song, C., ... Wang, L. (2024). Human Digital Twin in the context of Industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 85, 102626. doi: 10.1016/j.rcim.2023.102626
- Warke, V., Kumar, S., Bongale, A., Kotecha, K. (2021). Sustainable development of smart manufacturing driven by the digital twin framework: A statistical analysis. *Sustainability*, 13(18), 10139. doi: 10.3390/su131810139
- Wongvibulsin, S., Martin, S. S., Steinhubl, S. R., Muse, E. D. (2019). Connected health technology for cardiovascular disease prevention and management. *Current treatment options in cardiovascular medicine*, 21, 1-15. doi: 10.1007/s11936-019-0729-0
- Wu, Y., Zhang, K., Zhang, Y. (2021). Digital twin networks: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(18), 13789-13804. doi: 10.1109/IIOT.2021.3079510
- Yakovchenko, V., Hogan, T. P., Houston, T. K., Richardson, L., Lipschitz, J., Petrakis, B. A., ... McInnes, D. K. (2019). Automated text messaging with patients in Department of Veterans Affairs Specialty Clinics: cluster randomized trial. *Journal of medical Internet research*, 21(8), e14750. doi: 10.2196/14750

- Zhang, J., Li, L., Lin, G., Fang, D., Tai, Y., Huang, J. (2020). Cyber resilience in healthcare digital twin on lung cancer. *IEEE Access*, 8, 201900-201913. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3034324
- Zhang, Z., Wen, F., Sun, Z., Guo, X., He, T., Lee, C. (2022). Artificial intelligence-enabled sensing technologies in the 5G/internet of things era: from virtual reality/augmented reality to the digital twin. *Advanced Intelligent Systems*, 4(7), 2100228. doi: 10.1002/aisy.202100228
- Zheng, Y., Lu, R., Guan, Y., Zhang, S., Shao, J. (2021, June). Towards private similarity query based healthcare monitoring over digital twin cloud platform. In *2021 IEEE/ACM 29th International Symposium on Quality of Service (IWQOS)* (pp. 1-10). IEEE. doi: 10.1109/IWQOS52092.2021.9521351
- Zhong, X., Babaie Sarijaloo, F., Prakash, A., Park, J., Huang, C., Barwise, A., ... Dong, Y. (2022). A multidisciplinary approach to the development of digital twin models of critical care delivery in intensive care units. *International Journal of Production Research*, 60(13), 4197-4213. doi: 10.1080/00207543.2021.2022235