

## DIJİTAL İKİZ VE SAĞLIK UYGULAMALARI DIGITAL TWIN AND HEALTH APPLICATIONS

### İffet Aynacı

Sorumlu Yazar, Yüksek Lisans Öğrencisi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, ORCID: 0000-0001-6840-1474, [iertekin96@hotmail.com](mailto:iertekin96@hotmail.com),

### ÖZET

*Dijital İkiz, gerçek dünyayı dijital ortamda yaşatabilen ve gelecek yargılarını yeniden dizayn edebilecek bir teknolojidir. İkizi oluşturmak istenilen sistemlere yerleştirilen sensörler aracılığıyla, verilerin en güncel hali dijital ortama aktarılarak ve fiziksel modelleri de bir aynadaki yansıması gibi modellenerek gerçekleştirilmektedir. Pek çok alanda karşılaştığımız dijital ikiz, sağlık alanında hem koruyucu hem tedavi edici hem de genel sağlık sisteminin yönetiminde karşımıza dikkat çekici bir konumda çıkmaktadır. Sağlıkta geliştirilmesi ve gelecekteki konumu hakkında verilerle konuşabilmemiz adına dijital ikiz bize önemli bir yol haritası sunmaktadır. Bu çalışma, dijital ikiz teknolojisinin ne olduğunu ve bu teknoloji ile sağlık alanında neler yapılabildiğini dünyadaki örnekler üzerinden açıklamayı amaçlamaktadır. Böylece gelecekte yapılacak araştırmalara yol gösterici bir çalışma olacaktır.*

**Anahtar Kelimeler:** Dijital İkiz, Sağlık Yönetimi, Sağlıkta Gelecek

**Kabul Tarihi /  
Accepted:** 07.05.2020

**İletişim /  
Correspondence:**  
İffet Aynacı

**Benzerlik Oranı/  
Plagiarisim :** % 2

**Makale Türü/Article  
Type:** Araştırma  
Makalesi/ Research  
Article

### ABSTACT

*Digital Twin is a technology that can live the real world in digital environment and redesign future judgements. Through the sensors placed on the systems where the twin is to be created, the most current state of the data is transferred to the digital environment and the physical models are modeled as a mirror reflection. The digital twin, which we encounter in many areas, is both protective and curative in the field of health and stands out in the management of the general health system. The digital twin provides us with an important road map so that we can talk about the health promotion and its future position. This study aims to explain what digital twin technology is and what can be done with this technology in the field of health. This will guide the future research.*

**Keywords:** Digital Twin, Healthcare Management, Future in Health

## 1. Giriş

Dijital İkiz teknolojisi, gerçekte var olan bir cismin, sistemin ya da canlının sahip olduğu güncel veriler ile dijital ortamda oluşturduğu sanal bir varlıktır. Bu teknoloji her sektör için ayrı bir tarihe sahip olmakla birlikte ilk olarak NASA'da kullanıldığı bilinmektedir (Houten, 2018). Sağlık alanındaki uygulamalarına ve araştırmalarına bakıldığında henüz yeni gelişmekte olan bir teknoloji olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan araştırmalara ve geliştirilen ikizler incelendiğinde sağlık alanındaki uygulamaları üç türde karşımıza çıkmaktadır. İlk türü bir hastanenin ölçüm yapılması istenilen bölümlerine yerleştirilen sensörler ile dijital ikizinin tasarlanmasıdır. İkincisi, bir insanın genel sağlık takibini oluşturabilmek için sağlık verileri ile oluşturulan yaşayan bir dijital ikiz oluşturulmasıdır. Üçüncüsü ise, hastalıklı bir bölgenin hem takibini sağlamak için hem de yapılacak bir operasyon veya ilaç uygulamasının denemelerini test etmek için oluşturulan dijital ikizlerdir.

Sağlık harcamalarındaki artışın yıllara göre yükselerek ilerlemesi ülkelerdeki sağlık sistemlerinin karşılaştığı bir zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Sadece Avrupa'da 4 milyar avronun üzerinde sağlık hizmetlerine para harcandığı görülmektedir. Sağlık sistemlerinde maliyetlerdeki bu artış ekonomik sürdürülebilirliği de tehdit altına almaktadır (Spilker, 2018). Dijital İkizler, oluşan bu tehditleri önlemek ve ileride oluşabilecek sorunları günümüzde öngörerek çözümlerini sunmayı hedeflemektedirler. Yalnızca bir sistemin verilerinden oluşan ikiz olmaktan çıkıp sağlık sisteminin gidişatına yönelik yorumlar yapabilecek ve karar verebilecek alt yapıya sahiptir. Dijital İkiz'in bu alt yapısı tek başına bir teknolojiden oluşmamaktadır. Temelinde nesnelere interneti, simülasyon ve yapay zeka gibi teknolojiler yer almaktadır. Bu alt yapı ile araştırma merkezlerinde geliştirilmeye devam eden ve umut vadettiği öngörülen bir teknolojidir. 1970'lerden beri teknolojik alt yapısıyla karşımıza çıkan Dijital İkiz, günümüzde pek çok sağlık sorununa çözüm olabilecek klinik araştırmalarda da kullanılmaktadır. Gelecekte sağlık sisteminde köklü değişikliklere neden olabilecek bir yapısı bulunmaktadır (Hempel, 2017). Özellikle insan üzerindeki uygulamaları hakkında dünyadaki önemli araştırma merkezlerinde ileri düzey araştırmalar hala sürmektedir. Sağlık alanındaki gelecek araştırmalara ve tartışmalara konu olacaktır.

## 2. Dijital İkiz

Dijital İkiz kavramı, ilk olarak 2002 yılında (Grieves ve Vickers, 2007:86), Michigan Üniversitesinde Dr. Michael Grieves tarafından kullanılmıştır (Puri, 2017). Ancak Dijital İkiz'in temelinde olan simülasyon teknolojisini 1970 yılında NASA'da görmekteyiz. Yani ismen hayatımıza girişi 2002 olsa da teknik olarak daha eskiye dayanmaktadır. 1970 yılında NASA Apollo 13 isimli uzay aracını Ay'a göndermesinden kısa bir süre sonra teknik arızalardan dolayı aracı geri getirmek zorunda kalmış ve kurtarma operasyonu başlatılmıştır. Kurtarma operasyonunun en önemli noktası NASA'nın gönderdiği uzay aracının bileşenlerinin ayna gibi birebir aynı verilere sahip olan bir modelini elinde tutması olmuştur. Bu sayede mühendislerin geri dönüş için olası çözümleri modellemeleri ve test etmeleri sağlanmıştır. Yani Apollo 13'teki şartlar birebir taklit edilmiştir. Apollo 13'ün ekibini geri döndürme koşullarını test etmek için Houston ve Kennedy Uzay Merkezi'nde simülasyonlar yapılmış böylece kazadan 4 gün sonra hiçbir kayıp vermeden astronotların geri dönüşü sağlanmıştır. NASA, bu olaydan sonra sistemlerini sürekli izleyebileceği ve daha hassas veri güncellemesi yapabileceği dijital modeller kullanmaya başlamıştır. İncelendiğinde Dijital İkiz ile kullandığı sistemin temelinde yatan teknik aynı olmuştur. Fiziksel bir nesne modeli oluşturulmuş ve bu sistemlerin durumunu izleyebilmek, sorunlarını teşhis edebilmek ve çözümlerini test edebilmeyi sağlayan bir "ikiz" yaratılmıştır (Houten, 2018). Bu sayede NASA uzay araştırmalarında, bugünün dijital ikizinin öncüsü olan eşleştirme teknolojisini ilk kullanan olmuştur. Bugün ise yeni modeller, yol haritaları, yeni araçlar ve yeni sistemler geliştirmek için dijital ikizleri kullanmaktadır (Marr, 2017).

Dijital İkiz teknolojisi, fiziksel bir sistemin dijital bilgi yapısının kendi başına bir varlık olarak oluşturulabileceği fikrine dayanmaktadır. Bu dijital bilgi, bir sistemin içinde olan ve tüm yaşam evresince o fiziksel sisteme bağlanan bilgilerin "ikizi" olacaktır. Böylece her bir sistem, iki sistemden oluşmaktadır. Bunlar; gerçek bir fiziksel sistem ve bu sistem hakkındaki tüm bilgileri içeren yeni bir sanal sistemdir. Bu, gerçek alanda var olanla sanal alanda var olan arasında bir yansıtma veya ikizlik olduğu anlamına gelmektedir (Grieves ve Vickers, 2017).

Dijital İkizleri, gerçek ve dijital sistemler arasındaki bir bağlantı olarak düşündüğümüzde karşımıza 3 bileşen çıkmaktadır. İlk olarak gerçek dünyadaki bir sisteme ihtiyacımız vardır. İkincisi, bu sistemdeki verileri gerçek zamanlı eş olarak dijital ortama aktarabilecek, güncelleyebilecek ve uyarı verebilecek sensörlerdir. Üçüncüsü ise, bu verilerin düzenli olarak aktarılacağı dijital bir ortamdır. Akıllı bileşenlerden oluşan bu sensörler, gerçek bir sistemle bütünleştirilmiş haldedir. Bileşenler, sensörlerin izlediği tüm verileri alan ve dijital sisteme işleyen bulut tabanlı bir sisteme bağlıdır. Gerçek sistemlerdeki bu veriler dijital sisteme düzenli olarak aktarılıp güncelleştirildikçe "Dijital İkiz" oluşturulabilmektedir (Marr, 2017). Dijital İkiz oluşturulurken bahsettiğimiz bu aşamalar endüstri 4.0, nesnelerin interneti ve yapay zeka alt yapısı ile sağlanmaktadır. Fiziksel sistemlerin ya da nesnelerin üzerine yerleştirilen bu sensörler sayesinde bulut tabanlı bir sisteme bağlanması sonucunda gerçek zamanlı verilerin alınması mümkün olmaktadır. Böylece normal zaman akışında test etmenin maliyetli ve zor olduğu nesnelere veya kompleks sistemleri dijital ikizleri üzerinden denemeler yaparak ilerleyen zamanlarda bir sorunla karşılaşmadan çözülmesi sağlanabilmektedir (Ağrikli, 2018:82).

Puri (2017), Network World'un Kasım 2017 tarihinde yayınlanan makalesinde dijital ikizi kendi içinde ikiye ayırmaktadır. Birincisi fiziksel sistemdeki sensörlerden gelen verileri sürekli okuyarak bulut ortamından dijital ortama simüle edip üç boyutlu görüntülemeyi sağlayan bir dijital ikiz oluşumudur. İkincisi ise, "öngörücü ikiz" olarak da adlandırdığı verilerin alındığı fiziksel sistemin gelecekteki durumu ve gösterebileceği davranışlar hakkında bilgi verebilen bir dijital ikizdir. Bu ikiz, fiziksel sistemdeki arızaları öngörebilir ve geçmiş verilerle birlikte yorumlayarak sistemlerin karar almalarına yarar sağlamaktadır.

Dijital ikizde sınırsız senaryo ve denemeler yapılabilmektedir. İleri derecede ise şunları yapabilmemizi sağlamaktadır;

- Sistemlerin verilerinden analizini çıkararak onlar hakkında verilen kararları değerlendirebilmeyi,
- Sistemlerdeki süreçlerin performanslarını görebilmeyi ve bunu görselleştirebilmeyi,
- Uzaktan kontrol mekanizması ile sistemlerdeki servis maliyetlerini düşürebilmeyi,
- Gelişmiş izleme ve bağlantı özelliği ile diğer sistemler ile bağlayarak arasındaki ilişkiyi görebilmeyi,
- Sistemlerdeki gelişebilecek sorunları gerçekleşmeden çözerek olayları çözüme sürelerimizi azaltmayı,
- Karmaşık sistemleri ve süreçleri dijital ortamda izlememizi sağlayarak içindeki iletişim ağını anlamamızı sağlamaktadır (Kitain, 2018).

Dijital İkizler, nesnelerin interneti ile fiziksel gerçek bir sistemin performansını daha etkili nasıl gösterebileceğini, sistemdeki süreçlerin nasıl işlediğini ve bu süreçlerin sonuçlarındaki verilerin ne olacağı hakkında bilgi vererek kurumsal karar vermeyi geliştirirler. Böylece kurumun dijital ikizleri, verileri eş zamanlı izlemeyi sağlayarak ve gelişen süreçteki verimliliği arttırmayı hedefleyerek örgütsel süreç modellerini ortaya koymaya fayda sağlamaktadır (Panetta, 2018).

Gerçek bir dijital ikiz, sistemin bütün verilerini gerçek zamanla eş olarak güncellediği için fiziksel sistemin kendisinden farklı değildir. Bu dijital ikizin sistemi öğrenmek için nasıl

kullanılabileceği ve eğer varsa yeni tasarımları keşfetmek, simüle etmek ve test etmek için nasıl kullanılabileceği sorusunu ortaya koymaktadır (Batty, 2018). Yani geliştirilen bu teknolojinin hangi alanlarda nasıl fayda sağlayacağı veya daha önce hiç karşılaşmamış hangi sorunları ortaya çıkaracağı soruları akademi dünyasına bir çok araştırma sorusu bırakmaktadır.

### 3. Sağlık Alanında Dijital İkiz

Dijital İkiz uygulamaları birçok sektörde karşımıza çıkmaktadır. İmalat sektöründe, fabrikaların dijital ikizlerinin yaratılarak yönetilmesi ve yeni ürünler hakkında karar verme süreçlerinde rol alabilmektedir. Otomotiv sektöründe, otomobillere telemetri sensörleri takılarak dijital ikizleri oluşturulur. Böylece risk kapasitesi yüksek olan bir sektörde otomobillerdeki hata paylarını en aza indirebilmek mümkün olur.

Sağlıkta dijital ikiz ise, insanların veya diğer medikal sistemlerin simülasyonu ile dijital ikizlerini üreten bir sektördür. Yara bandı büyüklüğünde veya daha minimal sensörler sayesinde sağlık bilgilerini, kişinin vücudundaki işlemlerin süreçlerin izlenebilmesini, bu süreçlerin gidişatını ve sonucunu tahmin etmek için kullanılmaktadır (Shaw ve Fruhlinger, 2019).

Dijital ikizler, sağlık hizmetlerinde iki farklı şekilde karşımıza çıkmaktadır. Birincisi hastane tasarımında olurken ikincisi hasta bakımındadır. Hastanelerin dijital ikizleri gerçek bir hastanenin verilerini taşımaktadır. Bu hastane modelleri maliyetleri kontrol etmeyi sağlamaktadır. Aynı zamanda hastaların bakımını en üst düzeye çıkarmak için hasta yataklarını ve ameliyathane gibi diğer servislerinde planlanmalarına yardımcı olmaktadır. Böylece, dijital ikizi olan bir hastane, yöneticilerine kritik veriler sunmaktadır. Dijital ikizler, hastanedeki işleyişin performans etkinliğini izleyerek, hastanedeki yatakların kullanım oranı, ameliyathanelerdeki mikropların oranı ve yayılması gibi sorunlar doğmadan önce bilinmesi gereken verileri ve çözümler için denemeleri yöneticilere sağlamaktadır (Hempel, 2017).

Dijital İkiz teknolojisi ile sağlık alanında uygulanması için geliştirilmiş veya henüz geliştirme aşamasında olan çalışmalarla ilgili toplam 14 örnek ele alınmıştır. Bu örnekler yapılan deneysel çalışmaları ve sektöre sunulan ürünleri de içermektedir.

Hastane tasarımındaki dijital ikiz örneği olarak karşımıza İrlanda'daki Mater Özel Hastaneleri çıkmaktadır. İrlanda'da önde gelen hastanelerden biri olan Dublin'deki Mater Özel Hastanesi(MPH), radyoloji departmanındaki bazı sorunlara çözüm aramaktadır. Hasta talebinin, bekleme sürelerinin ve klinik karmaşıklığın artması sonucunda alan yetersizliği meydana gelmiştir. Bu yetersizliklerin artması, gecikmelerin ve kesintilerin oluşması hastaların bakımında verimin düşmesine sebebiyet vermiştir. Bu nedenle yeni bir sistem arayışına girmişlerdir. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için MPH ve Siemens Healthineers, MPH radyoloji bölümünün alt yapısını ve düzenini yeniden tasarlamak için ortak olmuşlardır. İş akışlarını simüle etmek için operasyonel verileri toplayıp analiz etmişlerdir. Böylece iyileşmeleri daha net görebileceklerdir. Bir hafta sonunda radyoloji departmanının 3D bilgisayar modelini oluşturmuşlardır. Nicel raporları alabilecekleri, farklı operasyonel senaryoları deneyebilecekleri ve yeni düzenekleri test edebilecekleri bir dijital ikiz oluşturulmuştur. Dijital İkiz'in MPH için verdiği bazı veriler ve tavsiyelere göre;

- BT için 13 dakika ve MRG için 25 dakika daha az vakit harcanırsa hastaların bekleme süreleri kısalabilecektir.
- BT için 28 ve MRG için 34 dakika daha az vakit harcanırsa hastalara daha hızlı geri dönüş sağlanabilecektir.
- MRG %32 ve BT %26 daha fazla çalışırsa artan ekipman kullanımı kalmayacaktır.
- MRI için günlük 50 dakika daha fazla mesai yapılırsa, personel maliyetleri düşürülerek yıllık 9,500 Euro tasarruf edilebilecektir. Dijital İkizin verdiği bilgiler ışığında hastane yönetimi planlama ve organizasyonu daha net yapabileceklerdir (Scharff, 2018).

Dijital ikizler, her hastaya, özel sağlık hizmetinde bir sonraki adımı geliştiren teknolojidir. Bir insanın dijital ikizi ise, bilgisayarda çalışan ve vücudun her organının bütün fizyolojik süreçlerinin temsili olan bir sistem olduğunu hayal ettiren bir teknolojidir. Kişinin dijital ikizi; fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler kişiye özel eşsiz bir bütünü, olduğu gibi göstermektedir. Silico, insan fizyolojisini çeşitli tıbbi yollarla ilerletmeyi hedeflemektedir. Bilgisayar üzerinde tıbbın gelişimi olarak da söylenebilmektedir. Böylece dijital ikiz, bilgisayar modelleriyle bir ilacın etkilerini Silico klinik deneyler ile test etmesini sağlayabilir.

Sağlık sektöründe ve hizmetlerinde dijital ikizlerin doğuşu "Sanal Benlik" kavramının kullanımı ile girdiği ve teknolojinin ilerleme kaydetmesi ile hayatımızda yer aldığı görülmektedir. Bu gelişmelerin başında 1980'lerde bilgisayar tomografisinin yaygınlaşması gelmektedir. Sanal benliğe kardiyovasküler sistemin ana noktası olan kalbin sanallaştırılması bir örnek olarak gösterilebilir. Bu model, insan kalbini kanı pompalarken simüle eder. Kan akımını, içindeki oranları, damar duvarlarındaki hücresel etkileşimleri ve kalp kasının reaksiyonlarını da birlikte simüle ederek hastalıkları tanımlamak, ilaç etkilerini değerlendirebilmek ve tedavide en etkili yöntemi belirleyebilmek için kaynak olacaktır (Závodszy ve Hoekstra, 2018:18).

Yeni ilaçların daha hızlı ve daha verimli kullanılması için yapılan tıbbi araştırmalarda laboratuvar hayvanlarının kullanılması azaltılmaya çalışılmaktadır. Dijital İkizler, bilgisayarların ilacı test ettiği silico klinik çalışmalarında da kullanılabilirler. (University of Amsterdam, 2018). Yaşayan Kalp isimli projeyi, 2014 yılında Dassault Systèmes ile ABD Gıda ve İlaç Dairesi(FDA) 5 yıllık bir anlaşma imzalayarak yürütmeye başlamıştır. Böylece ilk defa bir organın tamamının simüle edilmesi, ilaç etkileşimlerini görebilmek için kullanılmıştır (Dassault Systèmes, 2017). SIMULIA Yaşayan Kalp, çok çeşitli klinik ölçümlere göre onaylanmış ve bir insan kalbinin simüle edilerek oluşturulan bir dijital ikiz modelidir. İnsan kalbinin modellenerek dijital ikizinin oluşturulması için eğitimciler, kardiyovasküler alanındaki araştırmacılar, tıbbi cihaz geliştiricileri, klinisyenler ve diğer düzenleyici kurumlar birlikte çalışmışlardır. Bu modeller, gelişmiş hasta bakımı için ve bilgisayar ortamında geliştirilen tıbbin kardiyovasküler alanında bir temel oluşturmaktadır. Bilgisayar simülasyonu ile doktorlar kalp dokusundaki hareketlilikten dolayı göremediklerini görebilme ve kalpteki karmaşık yapıyı birebir aynı organ modeli üzerinden denemeler yaparak çalışma fırsatı bulmuşlardır. Hastaya özel yaşamsal bulguların girilmesiyle kişiselleştirilmiş tedaviye ve gelecekteki tıbbi tedavilerde umut verici araştırmalara yol açmaktadır. Tıbbi araştırmalarda klinik deneme maliyetlerini azaltarak daha etkili ve yeni yöntemlerin geliştirilmesine yönelik araştırmalar yapılmasını teşvik etmektedir. Hayvanlar üzerinde yapılan pahalı deneylerin yerine kalp fonksiyonunun simülasyonu ile oluşturulan dijital ikizlerin daha iyi tasarımlarının yapılmasına, yeni tedavi yöntemlerinin geliştirilmesine öncülük etmektedir. SIMULIA ürünleri, bu nedenle kalite standartlarını üstünde ve yenilikçi bir ortam sağlamaktadır (D'Souza, 2015).

Philips firması da kalbin simülasyonunu yaparak dijital ikiz oluşturabilmek için çalışmalar yapmış ve bunun için tıbbi görüntüleme cihazları üzerine yoğunlaşmıştır. Dijital İkiz konseptini anlatan ve içeriğinde bir hastanın kalbinin dijital ikizinin oluşturulmasını konu alan kısa bir film yayınlamıştır. Hasta verilerinin işlenişini, doktorların tedavide ve yapılacak operasyonlarda karar verme süreçlerini nasıl etkilediğini anlatmıştır (Philips, 2018). Ancak kalbin anatomisindeki ince işleyişin simüle edilmesi oldukça sıkıntılı bir süreçtir. Bu yüzden bu aşamada çok disiplinli bir çalışma ve farklı meslek yapılarından bir ekip kurulması gerekmiştir. Philips'in genel müdür yardımcısı olan Henkvan Houten, 2018'in Kasım ayında yayınladığı bir yazısında "HeartModel"i nasıl geliştirdiklerini anlatmıştır. "HeartModel" ile kalbin genel olarak bilinen modelini nasıl kişiselleştirilmiş hale getirildiğini detaylarıyla göstermiştir. Bu modelin asıl amacı, kalbin anatomisi hakkındaki bilimsel bilgiler ile daha önceden kanıtlanmış olan veri analizlerini birleştirmektir. Yani bir cihazın dijital ikizinin nasıl çalışacağını göstererek veri analizi ve modelleme teknikleriyle birlikte cihazın önceki bilgisinin de yüklenmesi ile gerçekleştirdiğini anlatmaktadır.

Philips'in geliştirdiği tıbbi cihazlardan bir diğeri olan Philips Heart Navigator, yapılacak operasyondan önce çekilen görüntüler ile hastanın kalbinin anatomisi ile ameliyat sırasında çekilen canlı X ışını bilgisinin birleştirilmesini sağlayarak cerrahın doğru cihazı seçmesine yardımcı olmaktadır. Ameliyat sırasında cihazı doğru konumlandırmak için bir içgörü sağlamaktadır. Bu iki teknolojinin de gelecekte sanal gerçeklik oluşturulurken kullanılacağını öngörmektedir. "Sanal bir kalpten tam bir dijital hastaya" başlığı ile gelecekteki odaklandıkları teknolojiye de dikkat çekmektedirler (Houten, 2018). HeartModel hakkında yaptıkları çalışmaları ile bu hedeflerine doğru ilerledikleri görülmektedir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda iki boyutlu ve canlı üç boyutlu HeartModel arasındaki niceliksel farklılıkları karşılaştırdıklarında ve otomatik yetenek kullandıklarında HeartModel için % 82 zaman tasarrufu olduğu ve küçük düzenlemeler gerektiğinde ise % 63 zaman tasarrufu olduğunu açıklamışlardır (Philips, 2016:3).

Siemens Healthineers, büyük miktarda verileri üreterek analiz edebilen akıllı algoritmalar üretmektedir. Heidelberg Üniversitesi'ndeki bir araştırma projesindeki kardiyologlar bu algoritmaların kardiyak senkronizasyonundaki kullanımını test etmişlerdir. Kardiyak yeniden senkronizasyon tedavisi, kalbin odacıkları ile ilgili bir tedavidir ve kronik konjestif kalp yetmezliği olan hastalar için bir seçenektir. Heidelberg Üniversitesi'ndeki kardiyologlar kalbin elektriksel sinyallerini elektrot yardımı ile bilgisayar ortamında simüle ederek yapay zeka alt yapılı dijital ikizini oluşturmuşlardır. MR görüntüleri ve EKG ölçümleriyle yapılan bu modeller, ilk ve tam olarak bir kalbi simüle etmiştir. Doktorların hastalara kesin tanı koyabilmeleri için yapay zeka ile destekli bir model geliştirilmesi dijitalleşmenin mükemmel bir örneği olarak karşımıza çıkmaktadır. Böylece oluşturulan İkiz'de, farklı senaryoları deneyerek hem tedavideki iyileşmeyi sağlayarak hem de zamandan tasarruf ederek gelişebilecek diğer hastalıkları erken tanı ile fark edebilmeyi sağlamaktadır (Siemens Healthineers, 2018:2).

Dünya çapında milyonlarca insan; hastalıkları, metabolizmaları ve yaşam verileri farklı olmasına rağmen hastalığını tedavi edebilecek umuduyla aynı türdeki ilaçları kullanıyorlar. Pek çoğu tedavide etkili olmuyor ve ölümcül sonuçlarla karşılaşılıyorlar. Avrupa'da her yıl 200.000'e yakın insan ilaç reaksiyonlarının olumsuz sonuçlarından dolayı ölmekte ve kişiye özel veya hastalığın olduğu bölgeye özel ilaçların geliştirilmesi bu olumsuz sonuçlara bir çözüm olabilecektir. Hedefi kişiselleştirilmiş tıbbi geliştirmek olan Alacris Theranostics şirketi, 2008 yılında Max Planck Genetik Enstitüsü'nün bir parçası olarak kurulmuştur. Şirketin Genel Müdürü Dr. Bodo Lange'dir. 2011'de ilk çalışmalarına başlamıştır. Hedefine ulaşabilmek için, bir kişinin DNA'larından elde edilen farklı veriler ile dijital ikizi oluşturmaktadır. Şu anda yapılan çalışmalar, tümörü tespit edip tedavi edebilmek için elde edilen bu verilerle kişiyi simüle edip farklı senaryolar geliştirerek denemeler yapmak üzerinedir. Kişiye özel çalışmalar yerine hasta gruplarıyla çalışmışlardır. Geliştirdikleri Dijital İkiz modeller ile hastalıklar oluşmadan çözmeyi ve sağlık sisteminde bozulma yaşanmadan onarmayı amaçlamaktadırlar (Spilker, 2018).

Dijital İkiz, pek çok araştırma için kullanılabilir ve gerçek sistemleri geliştirme için de çok önemlidir. Bir insandaki kabaca 40 milyar vücut hücresinin nasıl simüle edilip de dijital ikizinin oluşturulacağı ise akıllarda oluşan bir soru olmaktadır. Bu hücreler kalp, kulak, tırnak, yağ, karaciğer, akciğer, el, kol ve daha birçok organı oluşturan ve farklı işlemleri gerçekleştiren hücrelerdir. Her hücre kendi yaşam serüveni ile karşımıza çıkmaktadır. Hücreler, içine aldığı besin maddelerini ve molekülleri parçalayıp elde ettiği protein, yağ ve şekerleri işleyerek enerji üretmektedir. Bölünerek çoğalırlar ve ömürlerini tamamladıklarında ise ölürler. Bu biyokimyasal hayatın bir kimyasal tesis gibi simüle edilip edilemeyeceği düşündürmektedir. Akıllardaki bu sorular yapay zeka alt yapısı olan dijital ikiz ile bir çözüm aramaktadır. İlk olarak, geçmişteki pek çok tıbbi kaydın sisteme girilmesi ile oluşan büyük verilerin havuzu sayesinde karşılaşılan hastalıklı durumu veya hücrelerdeki süreci analiz etmeyi sağlamaktadır. Hücrelerden bazıları kanserli olduğunda, veri yığınındaki yapay zeka diğer tıbbi kayıtlar ile aralarında paralellikler aramaktadır. IBM bu işlemi süper bilgisayar Watson ile birlikte yapmakta ve vücuttaki biyokimyasal süreçleri simüle etmeği

hedeflemektedir. Milyarlarca hücrenin etkileşimini dünyanın en hızlı bilgisayarlarının bile anlayıp takip etmesi zordur ve neredeyse mümkün değildir. Fakat her hücre farklı işlemler görse de aynı genetik bilgiye sahiptir. Genom veya genetik materyal de diyebileceğimiz DNA, 20.000'den fazla gen içermektedir. Hücrelerdeki proteinler, hücreleri saldırgan ve yabancı maddelere karşı korur. Hormonlar ve enzimler ile metabolizmayı düzenler. Böylece dokunun dengesi korunmuş olur. Ancak hücrede bazı işlemler ters giderse hücreler kontrolsüzce bölünüp çoğalabilir ve tümör oluşumu gerçekleşebilir. Alacris bilgisayar modeli ise, 800 gen ve 45 biyokimyasal yöntem ile hücrenin neden bölündüğünü ve ölümüne sebep olan değişkenleri anlayarak gelişen durumu yorumlayabilmektedir. Böylece hangi ilaçların tehlikeli hücrelerin kontrolsüzce çoğalmasını durdurabileceği hastaların yapay zeka destekli dijital ikizleri üzerinde test edilebilmektedir. Kanser olan bir hasta grubunda normal tedavi süreçlerinde aldığı kemoterapi, immünoterapi, radyasyon sonucunda tümör öldürülemediği. Ancak kontrolsüzce bölünen hücrelerin %70'i dijital ikizinde tasarlanan sadece meme ve böbrek kanseri için geliştirilen bir ilacın hastalara uygulanmasından birkaç ay sonra tümörün biyopsisinden elde edilen veriler %15'e indiğini göstermektedir. Bilimde cevaplar yeni soruları da getirmektedir. Merak konusu olan yeni bir soru ise, dijital ikizin sonuçta hastaya önceki yöntemlerden daha faydalı olup olmayacağıdır. Bunun için daha fazla çalışmaya ve bu çalışmaların sonucunu görmek gerekecektir. Max Planck Direktörü Hans Lehrach, genetik analizlerin ve bilgisayar simülasyonları ile dijital ikizlerin oluşturulmasının rutin hale gelirse tedavi maliyetlerinin düşeceğini ve sağlık sisteminin daha iyi korunacağını öngörmektedir (Rauner, 2017).

Sinir bilimci ve mucit olan Christopher deCharms, 2008'de yayınlanan TED konuşmasında üç boyutlu modeller oluşturarak beyin işlemlerini gerçek zamanlı olarak izleyebileceğimizden ve beynimizin istediğimiz bölgesini yönetebileceğimizi anlatmıştır (TED, 2008). Henry Markram ise 2009'daki konuşmasında beyin çalışma sisteminin biyolojik yapısından ve bu yapıyı bilgisayarlara nasıl aktarabileceğimizden bahsetmiştir. Nöronlardaki elektriksel sinyallerin nasıl modellenebileceğini anlatmaktadır. Böylece beynin esrareniz sınırlarının çözülebileceğinden ve pek çok akıl rahatsızlıklarının tedavi edilebileceğini öngörmekteydi (TED, 2009).

2018'de ise Çinli araştırmacıların, insan beyninin en detaylı üç boyutlu beyin haritasını çıkarmayı hedeflediklerini anlatan bir makale yayınlanmıştır. Projelerin iki ana sorusu bulunmaktadır. Birincisi, beyindeki hafızanın nasıl oluştuğunu anlamaya çalışmaktadırlar. İkincisi ise, sinir ağlarının nasıl bağlantılı olduğudur. Bunu anlayabilmek için yapay zeka ve sinir bilim araştırmacılarıyla birlikte çalışmalar yapıldığı söylenmektedir. Amerika'da başlatılan Beyin İnisyatifi ve İnsan Beyni Projesi isimli iki projenin asıl hedefi insan beyninin işleyişinin bilgisayar ortamına aktaracak teknolojilerin geliştirilmesidir. Mavi Beyin Projesi ise, İnsan Beyni Projesinin alt projelerinden biridir (Serap, 2018). Mavi Beyin Hücresi Atlası olarak da geçen proje, fare beyninin tüm alanlarındaki hücrelerin sayısının, türlerinin ve konumlarının tanımlandığı en kapsamlı ve herkesin erişebileceği kaynaktır. Fare beyninin tamamını içeren ilk üç boyutlu atlas yayınlamıştır. Beyin alanlarının nasıl modellendiğini görebilmek için kendi sitelerine erişim herkese açıktır (Erövd, 2018:1).

Sim&Cure şirketi anevrizma tedavisi için geliştirdiği hasta merkezli simülasyon modeli tıbbi cihazları pazarlamaktadır. 25 ülkede 250'nin üzerinde hastanede 1500'den fazla operasyonun simüle edilerek yapılmasını sağlamıştır. Hata payını en aza indirmeyi amaçlamaktadırlar. Şirketin iki ana vizyonu bulunmaktadır. Birincisi kişiselleştirilmiş tıp, ikincisi ise hastaya uygulanan tedaviyi güvence altına alarak tedavi planlamalarını geliştirmektir (Sim and Cure, 2009). ANSYS ve Sim&Cure şirketleri, yeteneklerini birleştirerek geliştirdikleri bir dijital ikiz ile doktorların ameliyat esnasında implant cihazlarını yerleştirmelerine yardımcı olarak beyin anevrizmalarına etkili bir tedavi sağlamaktadırlar. Cerrahlar implantın yerleştirilmesini taklit ederek operasyon öncesi denemeler yapabilmektedirler. İmplant ve anevrizma arasındaki bağlantıyı görebilmek için dijital ikizdeki simüle edilmiş görüntüyü istediği gibi çevirip döndürebilmekte ve yakınlaştırarak denemeler yapabilmektedir. Yaptığı denemelerin hangisinin en iyi sonucu

vereceğini görmesi 10 ile 25 saniye arasında değişen süre zarfında seçilen cihaza göre değişiklik göstermektedir. Beş dakikada daha az bir sürede denemelerini tamamlayıp yapacağı operasyona göre en uygun olan cihazı seçebilir. Böylece ameliyatlardaki başarısızlık oranı düşecek, çalışma sürelerini azaltacak ve sağlık çalışanlarının verimli çalışma saatlerini arttıracaktır. Bu sistemlerin kullanıldığı yazılımı ANSYS mühendislik geliştirmektedir. ANSYS mühendislik, otomotiv sektöründen sağlık sektörüne kadar pek çok sektörde simülasyon teknolojilerine sahip yazılımları yapmaktadır. Sim & Cure ile birlikte bu operasyonların simülasyon yönteminden yararlanarak dijital ikiz teknolojisi geliştirmektedirler (Sanchez, 2018).

Sooma, depresyon ve diğer nörolojik, psikiyatrik rahatsızlıkları tedavi etmek amaçlı beynin elektriksel sinyallerini simüle eden cihazlar geliştirmektedir. Hastaların beyin aktiviteleri, günde 30 dakika ve haftada 1 gün olacak şekilde 3 hafta boyunca kafatasına yerleştirilen elektrotlar sayesinde simüle edebiliyorlar. Sooma Software Suite ile hastalar evlerinde de izlenebilmektedirler. Hastanın telefonuna günlük ruh halini ve hissiyatlarıyla ilgili verileri girebileceği bir uygulama yüklenmektedir. Bütün bu veriler doktorun internet üzerinden erişebileceği bir buluta güncellenerek yüklenir. Doktor bu verileri kullanarak tedavi sürecini izleyebilir ve tedavi programında değişiklikler yapabilmelerini sağlamaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda depresif hastalardaki beyin aktiviteleri ve metabolizmanın azaldığını veya bozulduğunu göstermektedir. Bu sorunları yaşayan, 18 ile 80 arası yaş grubu hastaların tedavi sonrası sonuçları değerlendirilmiştir. 113 hasta yani hastaların %59'u tedaviye tam cevap vermiştir. 165 hasta yani hastaların %86'sı ise kısmi cevap vermiştir. Toplamda 34 hasta tam iyileşme göstermiştir. Depresyondaki iyileşme ortalama %49 olmuştur. Hastaların genelinde iyileşme skoru %50 ile %75 arasında görülmüştür. Tedaviyi tamamlayan 191 hastaya 2879 tedavi seansı uygulanmıştır. En sık görülen yan etkiler tedavi esnasında elektrot altındaki kaşıntı hissi ve geçici baş ağrısı olmuştur. Ancak bunu dışında tıbbi müdahale gerektirecek bir yan etki görülmemiş ve tedavi güvenli kabul edilmiştir. Böylece bu bölgelerin simülasyonu ile beynin fonksiyonlarının normal hale getirilmesi ve onarılması mümkün olmuştur. Depresyon ilaçlarına alternatif oluşturabileceğini ve ilaç kullanımını azaltarak ilaçların yan etkilerini ortadan kaldırmayı hedeflemektedirler (Sooma, 2018).

Giyilebilir teknolojilerden karşımıza çıkan Myontec, ipliklerin arasında yerleştirilen teknolojisi sayesinde kaslardaki aktiviteyi ve egzersizlere karşı verdiği tepkileri vücudun genel sağlık durumuna göre analiz edip dijital bir ortama aktararak bu verilerin ışığında daha etkili egzersizler yaptırmaktadır. Myontec şirketi geliştirdikleri bir şort sayesinde antrenman yaparken kas aktivasyonunu, kalp atış hızı ile karşılaştırarak antrenman bölgelerini izleyebilmektedir. Kas yorgunluk eşiğini(MFT), tespit eden kas monitörü ile egzersizlerde hangi kaslara yoğunlaşılması gerektiğini göstermektedir. Kasların en iyi performans gösterdiği eşiği hesaplayarak antrenmanların verimini arttırmaktadır. Kasların yaralanma riskini azaltarak ısınma ve soğuma süreleri hakkında bilgi vermektedir (Myontec, 2018). Mbody Pro adındaki ürünü, antrenman veya oyun esnasında kaslardaki değişimi görebilmeyi ve hangi koşullarda nasıl davrandığını anlayabilmeyi sağlamaktadır. Üründeki, myontec sensör teknolojisi ile kaslardaki EMG verilerini kalp atış hızı, kalbin ritmi, kalp atım gücü ile birlikte kaydedip analiz etmektedir. Bir eğitim ortamı için düşünüldüğünde ise veri toplanması ve analiz edilmesi ile kas performansının değerlendirilmesini mümkün kılacaktır (PerformBetter, 2019).

Dijital İkiz'in gelişimi hakkında, dünya çapındaki pek çok şirket, hastane ve üniversite çalışmaktadır. Bünyelerinde araştırma grupları oluşturarak bir hücrenin nasıl simüle edileceğine odaklanmaktadır. Bu araştırmaların yapıldığı ve bünyesinde bulunan araştırmacılara eğitim veren bir kuruluş da Amsterdam Üniversitesi'nin Hesaplamalı Bilim Laboratuvarı'dır. Bu laboratuvarın araştırma temaları; kentsel karmaşık sistemler, hesaplamalı finans, işlemsel biyoloji, karmaşık sistemler teorisi ve hesaplamalı biyo-tıptır. Bu araştırmacıların katıldığı bir proje de Avrupa CompBioMed projesidir. ComBioMed araştırma ekibi 2018 yılında sanal insanın gelişimi ile ilgili kısa bir film yayınlamıştır



(University of Amsterdam, 2018). Filmde, her insanın yaşam tarzının, bedenindeki fizyolojik işleyişin aynı olmadığından ve hastalandıklarında kullanması gereken ilaçların da kişiye özel olması gerektiğinden bahsetmektedir. İnsan vücudunun performansındaki değişiklikleri, kendisi DNA'larından kodlanmış olan sanal bir ikiz ile görülebileceğini savunmaktadır. İnsan vücuduna ilaçların nasıl etki edeceği bir ikizde görülebilecektir. Böylece doktorlar kişi için en iyi ilacı seçebilecektir. İlaçların doğru bölgelere nasıl etki edebileceğinden, yaşam kalitesini arttırabilmek için gereken diyet, spor ve alışkanlıkların ne olması gerektiğine ve hatta kemiklerin nasıl güçlendirileceğine kadar doktorun karar verebileceği bir sanal ikizi anlatmaktadır (Computational Biomedicine, 2018).

Sanal Fizyolojik İnsani Bütünleştirici Biyomedikal Araştırma Enstitüsü, kısaca VPH Enstitüsü olarak da söylenmektedir. Belçika'da uluslararası kar amacı gütmeyen bir kuruluştur. Sağlıkta modelleme ve simülasyon kullanımı ile ilgilenen mühendisler, bilgisayar bilimcileri, biyologlar, klinisyenler ve pek çok akademik disiplin bu "İnsan sağlığını tahmin edebilir miyiz?" sorusu üzerinde yoğunlaşmışlardır. VPH Enstitüsü geniş araştırmacı kitlesi ile bu araştırma soruları hakkında çalışmalar yapmaktadır. Öğrenciler için yaz okulu kurarak başarılı araştırmacıları konuşmalarını dinlemelerini ve onlarla iletişim kurmalarını sağlamaktadırlar. Böylece sağlık hizmetlerini iyileştirmek ve geliştirmek isteyen akademik araştırmacıları bir araya toplamayı ve birbirleriyle bağlantı kurmalarını sağlamıştır (VPH Institute, 2019). Silico tıp alanında araştırmalar yapmakta ve bu çalışmalara destek vermektedir. İki yılda bir düzenlenen silico tıp alanındaki tartışmaları ve çalışmalarını yaygınlaştırmak için konferanslar düzenlenmektedir. PARİS'te VPH2020 adında Inria ve ortakları tarafından düzenlenecek olan konferansa da destek verecektir. Konferansın ana temasında, temel modelleme, metodolojiler, modelleme deneyleri ve klinik uygulamalar olacaktır (VPH Institute, 2018).

Discipulus, VPH Enstitüsü ile birlikte çalışan ve Avrupa Komisyonu tarafından finanse edilen bir projedir. Eylül 2011'den Mayıs 2013'e kadar sürmüştür. Amaçları kişiselleştirilmiş tıp üzerine çalışmalar yaparak Dijital Hasta kavramını tüm sağlık sistemi genelinde gerçekleştirmeye yönelik adımları atmaktır. Bu çalışmalar, gelişmiş modelleme, simülasyon, veri toplama, veri yönetimi ve gelişmiş kullanıcı ara yüzlerini içeren kapsamlı çözümler üreterek Dijital Hastanın çevresini genişletmeyi mümkün kılacağı düşünülmektedir (VPH Institute, 2019).

Avicenna ise, DG Connect öncülüğünde ve VPH Enstitüsü ile birlikte 2 yıllık AB tarafından finanse edilen bir projedir. Ekim 2013 ile Eylül 2014 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Sheffield Üniversitesinde silico klinik denemeleri yapılmıştır. VPH Enstitüsü, Linkeus ve Obsidian ile birlikte ortaklaşa gerçekleştirilmiştir. Silico tıp alanında akademi ve endüstriler arasındaki işbirliğini arttırmaya çalışmaktadır. Avicenna Alliance, 2016'da VPH Enstitüsü tarafından kurulmuştur. Amacı, silico tıbbın gelişmesine yönelik politikaları ve düzenlemeleri takip ederek gelişmeleri engelleyen durumları belirlemeye çalışmaktadırlar. AB seviyesindeki silico tıbbındaki herşeyi hem endüstrinin hem de araştırmacıların bir yol haritası oluşturabilmesini sağlamaktadır (VPH Institute, 2019).

### **3. Dijital İkiz Teknolojisinde Gelecek Görüşleri**

Gartner'ın 2019 için oluşturduğu en iyi 10 stratejik teknoloji trendleri arasında dijital ikiz dördüncü sırada yer almaktadır. Günümüz dijital ikizlerinin dört farklı noktasına bu araştırmada değinilmiştir. Birincisi, belirli işlerin sonuçlarının nasıl gelişeceğine odaklanan modellerin oluşturulmasıdır. İkincisi, gerçek sistemler ile dijital sistemin potansiyelini kontrol amaçlı kullanımını sağlamasıdır. Üçüncüsü, gelecekteki yeni fırsatları görebilmeyi ve geliştirebilmeyi, büyük veri analizi ile yapay zeka uygulamasını kullanabilmesidir. Son olarak dördüncüsü ise fiziksel sistemle dijital sistem arasındaki bağlantı sayesinde dijital ortamda deneme senaryoları tasarlanabilmesidir (Gartner, 2018).

Frey (2019), bu farklılıkları oluşturamayan ve bünyesine alamayan tüm şirketlerin sektörlerinde oyun dışında kalacağından bahsetmekte ve bu nedenle firmalar gelecek

stratejilerini çizerken bu durumu dikkate alarak adapte olacakları teknolojilerin uzun vadede dünyadaki konumlarını belirlemesine yardımcı olabileceğini vurgulamıştır.

IBM'in dijital ikiz ile yaptığı çalışmalar bilişsel dijital ikizin geleceğini oluşturmaktadır. Dijital ikizlerin vaadi olan müşterilerin tercihleri, kişiselleştirilmiş tıp, deneyimler ile hataların sıfıra yaklaştırılması, bilişsel bilgi işlem kullanımı ile dijital ikizlerdeki yetenekleri ve bilimsel disiplinleri daha da arttıracaktır. Bu yetenekler geleneksel mühendislik becerilerini arttıran, doğal dil işleme(NLP), makine öğrenmesi, nesne/görsel tanıma, akustik analiz ve sinyal işleme gibi pek çok gelişen teknolojilerdir. IBM, bilişsel dijital ikizlerin gelecekte tek bir bedene uyan modeller üzerinde çalışmak yerine modellerin tamamen kişiye özel inşa edileceğini söylemektedir (Mikell ve Clark, 2018).

Dijital İkiz'in bize sunduğu teknoloji ile gelecekle ilgili biraz daha ileri giderek akıllara pek çok soru bırakmaktadır. Bu sorulardan biri de kendi beynimizi anlayarak beynin sınırlarını aşıp aşamayacağımız sorusudur. İnsan beyni bir gün kendi beynini anlayabilir mi sorusu araştırmacıları şimdiden meşgul etmektedir. 30 yıl içinde bu sınırların çözülüp sınırların aşılıp aşılmayacağı merak konusu olmuştur (Serap, 2018).

#### 4. Sonuç

Dijital İkiz kavramı henüz sınırlı alanlarda kullanılıyor ve bazı çalışmalarda uygulanabiliyor olsa da aslında hayatımızın her köşesinde bu ikizleri kendimiz oluşturmaktayız. İnternet kavramının hayatımıza girdiği andan itibaren hayatlarımızın her köşesinde dijitalleşme ve sanallaşma meydana gelmektedir. Hayatlarımızdan alıntılarını sanal ortamlarda kaydederek veya paylaşarak sürekli izlenebilir bir kopya ortaya çıkarmaktayız. Bu kopyalar hayatlarımızın birer dijital ikizi haline gelmektedir. Gündelik hayatımızın bu derece içerisine hangi zaman diliminde gireceği belli olmamakla birlikte akıllara pek çok soru bırakmaktadır. Büyük bir alt yapıya sahip olan bu teknoloji önümüzdeki yıllarda hayatlarımızı kurtaracak derecede faydalı olurken güvenliğimizi tehdit edebilecek kadar tehlikeli boyutlar alabilir. Bu nedenle her teknolojinin avantajlı noktaları değerlendirilirken dezavantajlı yönleri de ele alınmalıdır. İlerleyen çalışmalarda dijital ikiz geliştirilirken güvenlik alt yapısının da aynı oranda geliştirilmesi gerekecektir.

Pek çok alanda uygulanabilir ve her amaca göre şekillendirilebilir bir teknoloji olduğundan dolayı küçük bir hücreden büyük organizasyon yapısına kadar aynı kavramdan bahsedilebilmektedir. Böylesine geniş kapsamlı bir teknolojiye her bilim dalının ve pek çok sektörün ilgi duyması kaçınılmaz olacaktır. Uzmanların görüşlerine ve yapılan çalışmalara bakıldığında önümüzdeki yıllarda bu kavram daha çok duyulacak ve daha çok kullanılacaktır. Sonuç olarak, ses getirecek çalışmalara imza atabilecek alt yapıya sahip olan bu teknolojinin geleceğe yön verecek olayların ve uygulamaların içerisinde yer alması beklenmektedir.

## KAYNAKÇA

- Ağrikli, M. (2018). Dijital İkiz ve Derin Öğrenme. *Makine İhracatçıları Birliği Aylık Dergisi. Temmuz*(122), 82-83.
- Alacris Theranostics. (2017). Digital Twins for Better Health. <http://www.alacris.de/future-healthcare/>(Erişim Tarihi, 26 Nisan 2019).
- Batty, M. (2018). Dijital ikizler *Çevre ve Planlama B: Kentsel Analitik ve Şehir Bilimi*, 45 (5), 817–820.
- Computational Biomedicine. (2018). CompBioMed Virtual Humans Film.<https://www.youtube.com/watch?v=1FvRSJ9W734> (Erişim Tarihi, 11 Nisan 2019).
- Dassault Systèmes, (2017). Dassault Systèmes' Living Heart Project Reaches Next Milestones in Mission to Improve Patient Care. <https://www.3ds.com/press-releases/single/dassault-systemes-living-heart-project-reaches-next-milestones-in-mission-to-improve-patient-car/> (Erişim Tarihi, 1 Mayıs 2019).
- D'Souza, K. (2015). Technology to Transform Lives: The SIMULIA Living Heart Model. <https://www.3ds.com/fileadmin/Industries/life-sciences/pdf/NAFEMS-Benchmark-Technology-to-Save-Lives-LHP-07-01-15.PDF> (Erişim Tarihi, 1 Mayıs 2019).
- Erö, C., Gewaltig, M. O., Keller, D. ve Markram, H. (2018). A Cell Atlas for the Mouse Brain. *Front. Neuroinform.* 12:84. doi: 10.3389/fninf.2018.00084
- Frey, T. (2019). Dijital ikizler hayatımızı nasıl etkileyecek?<https://www.capital.com.tr/yazarlar/thomas-frey/dijital-ikizler-hayatimizi-nasil-etkileyecek> (Erişim Tarihi, 2 Mayıs 2019).
- Gartner, (2018). Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/> (Erişim Tarihi, 23 Nisan 2019).
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *In Transdisciplinary perspectives on complex systems*(pp. 85-113). Springer, Cham.
- Hempel, V. (2017). Healthcare solution testing for future | Digital Twins in healthcare. <https://www.dr-hempel-network.com/digital-health-technology/digital-twins-in-healthcare/> (Erişim Tarihi, 20 Nisan 2019).
- Houten, H.V. (2018). The rise of the digital twin: how healthcare can benefit. Philips Haber Merkezi. [https://www.philips.com/content/corporate/en\\_AA/about/news/archive/blogs/innovation-matters/20180830-the-rise-of-the-digital-twin-how-healthcare-can-benefit.html/](https://www.philips.com/content/corporate/en_AA/about/news/archive/blogs/innovation-matters/20180830-the-rise-of-the-digital-twin-how-healthcare-can-benefit.html/) (Erişim Tarihi, 20 Nisan 2019).
- Houten, H. V. (2018). How a virtual heart could save your real one. <https://www.philips.com/a-w/about/news/archive/blogs/innovation-matters/20181112-how-a-virtual-heart-could-save-your-real-one.html> (Erişim Tarihi, 17 Nisan 2019).
- Kitain, L. (2018). Digital Twin—The New age of Manufacturing. <https://medium.com/datadriveninvestor/digital-twin-the-new-age-of-manufacturing-d964eeba3313> (Erişim Tarihi, 23 Nisan 2019).
- Marr, B. (2017). What Is Digital Twin Technology – And Why Is It So Important? <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/03/06/what-is-digital-twin-technology-and-why-is-it-so-important/#4d67dd832e2a> (Erişim Tarihi, 3 Nisan 2019).
- Mikell, ve M. Clark, J. (2018). Cheat sheet: What is Digital Twin? <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/iot-cheat-sheet-digital-twin/> (Erişim Tarihi, 12 Nisan 2019).
- Myontec. (2018). Myontec Intelligent Clothing. <http://www.myontec.com/> (Erişim Tarihi, 18 Nisan 2019).

- Panetta, K. (2018). Gartner Top 10 Strategic Technology Trends For 2019. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/> (Erişim Tarihi, 23 Nisan 2019).
- PerformBetter. (2019). Myontec Mbody Pro Portable EMG System. <https://performbetter.co.uk/product/myontec-mbody-pro-portable-emg/#detail> (Erişim Tarihi, 18 Nisan 2019).
- Philips, (2016). Automated transthoracic three-dimensional echocardiographic quantification of the left heart chambers. [http://incenter.medical.philips.com/doclib/enc/12475792/452299117141\\_HeartModel-Lange-et-al\\_WhitePaper\\_LR.pdf%3ffunc%3ddoc.Fetch%26nodeid%3d12475792](http://incenter.medical.philips.com/doclib/enc/12475792/452299117141_HeartModel-Lange-et-al_WhitePaper_LR.pdf%3ffunc%3ddoc.Fetch%26nodeid%3d12475792) (Erişim Tarihi, 17 Nisan 2019).
- Philips. (2018). Philips Digital Twin concept. <https://www.youtube.com/watch?v=H6JzPCbyVSM> (Erişim Tarihi, 11 Nisan 2019).
- Puri, D. (2017). Oracle's digital twins implifies design process for complex IoT systems. <https://www.networkworld.com/article/3235962/oracles-digital-twin-simplifies-design-process-for-complex-iot-systems.html> (Erişim Tarihi, 19 Nisan 2019).
- Rauner, M. (2017). Zum Arzt? Ihr Doppelganger geht schon! <https://www.zeit.de/zeit-wissen/2017/05/medizin-genomanalyse-digital-zwilling-zukunft-arzt-dna/komplettansicht> (Erişim Tarihi, 20 Nisan 2019).
- Sanchez, M. (2018). Brain Trust for Aneurysm Treatment. <https://www.ansys.com/about-ansys/advantage-magazine/volume-xii-issue-2-2018/brain-trust-for-aneurysm-treatment> (Erişim Tarihi, 28 Nisan 2019).
- Scharff, S. (2018). From Digital Twin to Improved Patient Experience. <https://www.siemens-healthineers.com/news/mso-digital-twin-mater.html> (Erişim Tarihi, 20 Nisan 2019).
- Shaw, K. ve Fruhlinger, J. (2019). What is a digital twin? [And how it's changing IoT, AI and more]. <https://www.networkworld.com/article/3280225/what-is-digital-twin-technology-and-why-it-matters.html> (Erişim Tarihi, 20 Nisan 2019).
- Serap, S. (2018). İnsan beyninin 3 boyutlu haritası: Hayal mi, gercek mi? <https://www.bilimveutopya.com.tr/makale/insan-beyninin-3-boyutlu-haritasi-hayal-mi-gercek-mi> (Erişim Tarihi, 17 Nisan 2019).
- Siemens Healthineers, (2018). Exploring the possibilities offered by digital twins in medical technology. [https://static.healthcare.siemens.com/siemens\\_hwem-hwem\\_sxxa\\_websites-context-root/wcm/idc/groups/public/@global/@press/documents/download/mda4/nzm4/~edisp/exploring-the-possibilities-offered-by-digital-twins-in-medical-technology-05899262.pdf](https://static.healthcare.siemens.com/siemens_hwem-hwem_sxxa_websites-context-root/wcm/idc/groups/public/@global/@press/documents/download/mda4/nzm4/~edisp/exploring-the-possibilities-offered-by-digital-twins-in-medical-technology-05899262.pdf) (Erişim Tarihi, 13 Nisan 2019).
- Sim and Cure. (2009). Product. <https://sim-and-cure.com/product> (Erişim Tarihi, 25 Nisan 2019).
- Sooma. (2018). Treatment Outcomes. <https://soomamedical.com/blog/new-and-updated-outcomes-for-sooma-depression-therapy/> (Erişim Tarihi, 15 Nisan 2019).
- Spilker, I. (2018). A crash test dummy for medicine. <https://www.t-systems.com/en/best-practice/03-2018/focus/digital-twin/healthcare-840446> (Erişim Tarihi, 12 Nisan 2019).
- TED. (2008). Christopher deCharms: A look inside the brain in real time. [https://www.ted.com/talks/christopher\\_decharms\\_scans\\_the\\_brain\\_in\\_real\\_time#t-139889](https://www.ted.com/talks/christopher_decharms_scans_the_brain_in_real_time#t-139889) (Erişim Tarihi, 23 Nisan 2019).
- TED. (2009). Henry Markram: A brain in a supercomputer. [https://www.ted.com/talks/henry\\_markram\\_supercomputing\\_the\\_brain\\_s\\_secrets](https://www.ted.com/talks/henry_markram_supercomputing_the_brain_s_secrets) (Erişim Tarihi, 12 Nisan 2019).
- University of Amsterdam. (2018). Your digital twin: closer than you think. <https://ivi.uva.nl/content/news/2018/04/your-digital-twin.html?1556017299749> (Erişim Tarihi, 11 Nisan 2019).
- VPH Institute. (2019). Avicenna. <https://www.vph-institute.org/avicenna.html> (Erişim Tarihi, 22 Nisan 2019).

- VPH Institute. (2010). Constitution of the VIRTUAL PHYSIOLOGICAL HUMAN INSTITUTE (VPH Institute) NON-PROFIT ORGANIZATION. <https://www.vph-institute.org/what-is-vph-institute.html> (Erişim Tarihi, 10 Nisan 2019).
- VPH Institute. (2019). Discipulus. <https://www.vph-institute.org/discipulus.html> (Erişim Tarihi, 22 Nisan 2019).
- VPH Institute. (2019). Insilico medicine will be the future. [https://www.youtube.com/watch?v=cse\\_GBcHsc](https://www.youtube.com/watch?v=cse_GBcHsc) (Erişim Tarihi, 16 Nisan 2019).
- VPH Institute. (2018). VPH2020 IN PARIS. <https://www.vph-institute.org/news/vph2020-in-paris.html> (Erişim Tarihi, 10 Nisan 2019).
- Závodszy, G. ve Hoekstra, A. G. (2018). How will Your Digital Twin be born? *ERCIM NEWS Special Theme Digital Twin*, 18-20.