



Journal of Aerospace Science and
Management

Vol: 2, No: 1, 20214 (58-80)

E-ISSN: 3023-5928

(Derleme)



<https://jasam.erciyes.edu.tr/>

<https://havacilik.erciyes.edu.tr/>

Havacılık Alanında Dijital İkiz Uygulamaları

Alınma

05 Mart 2024

Kabul

05 Nisan 2024

* Aybüke Nacak

e-mail:

4014330214@erciyes.edu.tr

Anahtar Kelimeler:

- Dijital İkiz
- Tasarım
- Modelleme

Aybüke NACAK

Uçak Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, 38039,
Kayseri, Türkiye

ÖZET

Dijital İkiz, en temel hali ile fiziksel varlık, sanal varlık (dijital ikiz) ve bu iki varlık arasındaki bağlantıdan oluşmaktadır. Bağlantı, çift yönlü ve anlık veri iletimi sağlamaktadır. Bu kabiliyet sayesinde fiziksel ürün meydana gelmeden, dijital ürün üzerinden fiziksel ürünün tüm özellik ve davranışları gözlemlenebilmektedir. Bu kabiliyet bize maliyet düşürme, süreci kısaltma ve üretim öncesi hata yapabilme olanağı tanımaktadır. Buradan da anlaşılabilceği gibi nedeni farketmeksizin üründe yapılacak değişikliklerin (örn. bir hatayı düzeltmek ya da optimizasyon yapmak gibi) sürecin en başı olan tasarım aşamasında yapılabilmesi sonraki süreçlerin daha sağlıklı ilerlemesine olanak sağlayacaktır. Bu nedenle tasarımın da ilk aşamalarında Dİ kullanılarak tüm süreci daha doğru, güvenli, hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde tamamlamak mümkün olabilir. Bu bilgiler ışığında, bu çalışmada tasarım aşamasında Dİ kullanımına daha detaylı değinilmiş ve bu çalışmanın daha sonra yapılacak tasarım çalışmaları için bir altyapı sağlaması amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışmada "Dİ nedir?", "Ne için kullanılır?", "Avantajları nelerdir?" soruları yanıtlanacak olup havacılık alanındaki uygulamaları üzerinden temel işlevleri, sanal alanda modelleme ve modelleme çeşitleri ile veri işlemleri detaylandırılmaktadır.

Digital Twin Applications in Aviation

Received

05 March 2024

Accepted

05 April 2024

* Aybüke Nacak

e-mail:

4014330214@erciyes.edu.tr

Keywords:

- Digital Twin
- Design

Aybüke NACAK

Department of Aeronautical Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences,
Erciyes University, 38039, Kayseri, Turkey

ABSTRACT

Digital Twin, in its most basic form, consists of physical entities, virtual entities (digital twin) and the connection between these two entities. The connection provides bi-directional and instantaneous data transmission. This capability gives us the option to reduce costs, shorten the process and make mistakes before production. As can be understood from here, making changes to the product (e.g. fixing a bug or optimizing) at the design stage, which is the very beginning of the process, regardless of the reason, will allow subsequent processes to progress more smoothly. For this reason, it may be possible to complete the entire process more accurately, safely, quickly and cost-effectively by using DT in the early stages of design.

In the light of this information, the use of DT in the design phase is discussed in more detail in this study, and it is aimed to provide an infrastructure for later design studies. Also in this study "what is DT?", "What is it used for?", "What are the advantages?" Their questions will be answered, and their basic functions, modeling and modeling types in the virtual field, and data processing through applications in the aviation field are detailed.

1. Giriş (Introduction)

“Dijital İkiz” kavramı ilk olarak 1960’lı yıllarda NASA (National Aeronautics and Space Administration)’nın Apollo projesi ile hayatımıza dahil olmuştur. Dünya yüzeyinden yaklaşık 200.000 mil uzaklıkta uzay aracının oksijen tankındaki sızıntı ve ana motordaki kritik hasar nedeniyle büyük bir problem ortaya çıkmıştı (Allen, 2021). NASA, bu arızayı anlayabilmek ve değerlendirmek için birden fazla simülatör kullandı ve aracın fiziksel modelini dijital komponentleri içerecek şekilde genişletti (Allen, 2021). Bu simülatörler tek başına bir dijital ikiz değildi ancak Dİ’ye atılmış ilk adımdı. Çoklu simülasyonların kullanımıyla bu kaotik duruma çabuk adapte olunabildi. Devamında uyarlamalar yapılarak uzay aracının anlık koşulları ile doğru eşleşmeler yapılabilirdi. Bu olaydan bir ders çıkarılıp uzay görevlerinin maliyetli oluşu ve zorluğu da göz önüne alınarak bu teknolojinin üzerinde daha çok çalışıldığı ve Dİ kavramının geliştirildiğini söylemek mümkün olsa da “Dijital İkiz” olarak adlandırılması, 2003 yılında Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM-Product Lifecycle Management) hakkında yapılan sunuma dayandırılmıştır (Grieves, 2014).

(Bengü & Fidancan, 2021)’a göre Dİ’nin endüstride sağladığı faydalar, fiziksel ve siber dünya arasında köprü işlevini yerine getirerek işletmelerin akıllı üretim ve hassas yönetim ile yönetilmesine imkan sağlar. Gerçek dünyanın aynası olan dijital ikiz, fiziksel üretim sistemlerini ve süreçlerini simülasyon ile tahmin ve optimize eder.

1.1. Dijital İkiz Nedir? (What is Digital Twin?)

En yaygın tanımıyla dijital ikiz, karşılık gelen ikizinin yaşamını birebir yansıtma işlevi gören karmaşık bir ürünün entegre çoklu fizik, çok ölçekli, olasılıksal simülasyonu anlamına gelir (Glaessgen & Stargel, 2012). Dİ, en temel şekilde gerçek dünyada var olan bir varlığın dijital dünyada eş zamanlı temsil edilmesi olarak tanımlanabilir. Bu eş zamanlı temsil, bağlantı ile mümkündür. Bağlantı, gerçek zamanlı verilerin toplanmasına ve ayrıca kontrol komutlarının paylaşılmasına olanak tanırken ağ, fiziksel varlık ve sanal varlığın verilerini iletmek için hayati öneme sahiptir (Segovia & Garcia-Alfaro, 2022).

Dİ, fiziksel varlıkları sanal dünyada haritalayabilme yeteneği sayesinde ilgili fiziksel varlıkların tüm yaşam döngüsünü ve sürecini yansıtabilir. Bu teknoloji kullanılarak sanal ürünün yaptığı önerilere göre fiziksel ürün; gerçek zamanlı durumlarda verdiği tepkiler yönünden daha akıllı hale getirilebilir. Sanal ürün ise fiziksel ürünün gerçek dünyadaki durumunu doğru yansıtacak şekilde daha gerçek hale getirilebilir.

Dİ; teknoloji, otomotiv, havacılık, inşaat, tarım, madencilik, kamu hizmetleri, sağlık, askeri, doğal kaynaklar ve kamu güvenliği sektörleri dahil olmak üzere birçok farklı alanda kullanılmaktadır (Attaran & Celik, 2023). Havacılık ve uzay sistemlerine yönelik modelleme ve simülasyon Amerika’dan Asya’ya geniş bir bölgede, farklı zamanlarda Nanjing Havacılık ve Uzay Bilimleri Üniversitesi, Pekin Havacılık

ve Uzay Bilimleri Üniversitesi gibi üniversiteler tarafından yapılan araştırma ve iş süreçlerinde kullanılmaktadır.

Örneğin, ABD Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı (AFRL- Air Force Research Laboratory), 2008 yılında tüm uçak sistemini simüle etmek ve tüm uçağın enerji verimliliğini artırmak için modeller kullanan, model tabanlı tasarım tekniklerinin geliştirilmesi için bir program başlatmıştır (Glaessgen & Stargel, 2012).

Daha önce de belirtildiği gibi dijital ikiz fiziksel ürün, sanal ürün, fiziksel ürün ile sanal ürün arasındaki bağlantı olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Sistemlerin modellenmesi ve simülasyonu dijital ikizin kurulmasının ve geliştirilmesinin temelini oluşturur. Ürün dijital ikizinin temel işlevlerinden bazıları fiziksel ürünlerin oluşum sürecini ve gerçek ortam davranışını simüle etmek, izlemek, teşhis, tahmin ve kontrol etmektir.

1.2. Dijital İkiz'in Temel İşlevleri (Main Functions of Digital Twin)

Simülasyon: Bir uçak düşünüldüğünde, sanal ortamın parametre ayarlarını değiştirerek uçağın farklı hizmet ortamlarındaki çalışma şartlarını simüle edebiliriz. Farklı uçuş görevi parametrelerinin görev başarı oranı, uçak sağlığı ve ömrü vb. üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için simülasyonlar kullanılabilir gibi aynı zamanda ürün sağlığını ve hizmet ömrünü iyileştirmek amacıyla farklı arıza, bozulma ve hasar azaltma stratejilerinin etkinliğini simüle etmek ve doğrulamak için de simülasyon kullanılabilir.

İzleme ve Teşhis: Ürün, üretim ya da hizmet süreci sırasında üretim/hizmet verileri (en son ürün üretim/kullanım durumu verileri, üretim/kullanım ortamı verileri gibi) ürün dijital ikizine gerçek zamanlı olarak yansıtılır. Böylelikle ürünün dijital ikizi, fiziksel ürün üretim/hizmet takibini, dinamik ve gerçek zamanlı olacak şekilde görsel izlemesini gerçekleştirebilir. Aynı zamanda elde edilen incelemelerin izlenmesi ve geçmişe dayalı olarak fiziksel arıza teşhisi ve arızaların giderilmesinde kullanılabilir (Wu vd., 2020).

Tahmin: Ürünün dijital ikizinin oluşturulması yoluyla; ürün üretim süreci, fonksiyon ve performans test süreci sanal alanda simüle edilip doğrulanabilir. Böylece potansiyel ürün tasarım kusurları, fonksiyonel kusurlar ve performans kusurları tahmin edilebilir. Bu kusurlar göz önünde bulundurularak, ürünün dijital ikizinde ilgili parametreler değiştirilerek ürün üretim süreci ile fonksiyon ve performans test süreci sorun çözümlene kadar yeniden simüle edilebilir.

Kontrol: Ürün, üretim/hizmet süreci sırasında, ürün kalitesinin ve üretim durumunun kontrolünü gerçekleştirmek için gerçek zamanlı üretim süreci verileri analiz edilir. Gerçek zamanlı hizmet verileri, fiziksel ürünün durum ve davranışının kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla analiz edilerek süreç daha sağlıklı şekilde sürdürülebilir.

2. Neden Dİ Kullanıyoruz? (Why Do We Use DT?)

Bizi, dijital ikiz kullanımına sevk eden aşağıdaki maddelerde örnekleri verilen birçok karmaşık sorun ve problem vardır. Dİ kullanımının amacı ise bu sorunlara çözüm bulmaktır.

1. Modern uçakların komponent sayılarındaki artış ve teknolojiye ilerleme ile birlikte karmaşıklığın giderek artması ile hata oranları artabilir. Güvenliğin üst düzey olması gereken havacılık

alanında bu, kabul edilebilir bir şey değildir ve Dİ, gerek tasarım gerek onarım gerekse malzeme ömrü ve sağlığının önceden saptanabilmesi amacıyla kullanılarak katastrofik kazaların önüne geçilebilir.

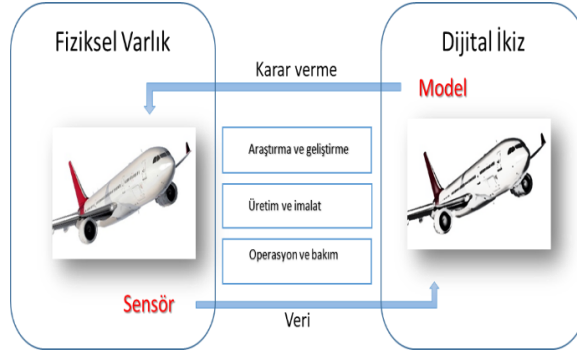
2. Uçak tasarım aşamasında tüm karmaşık adımlardan ayrı ayrı veriler toplanarak dijital ortamda birleştirilir ve dijital ortamda tasarım gerekliliklerinin karşılanıp karşılanmadığının doğrulaması hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde yapılabilir.

3. Bir uçak daima dinamiktir ve bileşenlerin durumu da zaman içinde hızla değişmektedir. Buna örnek olarak: Uçak uçuş ortamının belirsizliği ve bu belirsiz ortamda karmaşık sistemlerin kazara hasar görme olasılığının artması, bunun da uçağı hasara karşı savunmasız hale getirmesi verilebilir. Bu ortamda Dİ sayesinde anlık veri aktarımı ile olaya müdahale edilebilir ya da öngörülerde bulunulabilir böylelikle güvenlik artırılmış olur.

4. Bir başka husus da bu kadar karmaşık bir sistemle karşı karşıya kaldığımızda periyodik bakım ve sistemin mevcut durumuna ilişkin doğru bir tahmin eksikliği söz konusu olmaktadır. Çok sık muayene ve bakım yapılması veya zamansız bakım nedeniyle sistemin erken arızalanabilmesi de bir diğer sorundur. Bu da yüksek bakım maliyetlerine ve uçağın yetersiz güvenilirliğine neden olmaktadır.

Bunlar ve daha birçok sorunun çözümünde, iyileştirmelerde, uçak tasarımı ve geliştirilmesinde, uçak üretimi, uçak işletme ve bakımı alanlarına yönelik dijital ikizin kullanımının araştırılması ve uygulanması giderek artmaktadır. Dijital ikiz, fiziksel varlıkta bulunan sensörlerden toplanan verilerle sürekli olarak yenilenir ve Dİ, fiziksel varlığı kontrol eder. Bu, uçağın tasarımdan bakıma kadar tüm yaşam döngüsünün simülasyonuna olanak tanır.

Daha önce dijital ikizin üç bileşenden (fiziksel varlık, sanal varlık, fiziksel varlık ile sanal varlık arasındaki iletişim) oluştuğundan bahsedilmişti ve Şekil 1’de bunun uçak üzerinde temsili gösterilmiştir.



Şekil 1: Bir uçak için dijital ikiz sistemi (digital twin system for an aircraft) (L. Wang, 2020)

Tasarım geliştirme açısından dijital bir ortamın kurulması yani dijital ikizin kullanılmasının avantajları göz ardı edilemez ve bu teknoloji, tasarımın erken aşamalarında doğruluğun artmasına, kalite tahminine ve hataların erken tanımlanmasına olanak tanır. Üründe kolayca optimizasyon yapmayı sağlar ve en önemlisi bunu yaparken klasik yöntemlere göre maliyeti ve harcanan süreyi oldukça düşürür. Üretimde dijital ikizin kullanılması, üretim sürecini ve planlama şemasını optimize eder. Planlama kararlarının ve kaynakların tahsisinin daha rasyonel bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. Sistem işletimi ve bakımı açısından, dijital ikiz teknolojisinin geliştirilmesi yalnızca ürünün çalışma durumunu gerçek zamanlı olarak izlemekle kalmaz, aynı zamanda toplanan verilere dayanarak ürünün gelecekteki çalışma durumunu ve olası hatalarını da tahmin edebilir. Bakım programını optimize eder, revizyon sayısını azaltır ve ürün operasyonunun güvenilirliğini artırır.

Görüldüğü üzere dijital ikizin uçaklar üzerinde de kullanıldığı farklı aşamalar ve alanlar vardır. Tasarımda Dİ kullanımının büyük artıları mevcuttur örneğin: Bir ürünün dijital ikizi tasarım aşamasından itibaren oluşturulabilirse daha fazla ilgili tasarım verisi, pazarlama verisi, kullanıcı deneyimi verisi vb. dijital ikize entegre edilebilir ve bu da daha iyi sonuçlar elde edilmesini, üretim aşamasında ve üretim sonrası aşamada da daha kaliteli hizmet verilmesini sağlar. Bu kısımda dijital ikiz odaklı ürün tasarımı (DTPD-digital twin-based product design) için bir referans sistem sağlamaya çalışılmaktadır.

Dijital ikizin bölümlerinden biri olan fiziksel varlıklar, kullanıcılar tarafından çalıştırılabilen gerçek yani fiziksel olarak var olan ürünlerdir. Hammadde veya parçalardan talaşlı imalat, montaj ve diğer işlemler yoluyla üretilirler. Fiziksel varlıklar; üretim, kullanım, bakım onarım ve revizyon (MRO-Maintenance, Repair and Operations) ve diğer işlemler sırasında farklı özellik, davranış ve performans gösterirler. Bu aşamalarda birçok veri üretilir.

Sanal modeller, fiziksel ürünlerin sanal alandaki ayna görüntüleri ve birebir eşleşmeleridir. Tüm yaşam döngüsü sürecini yansıtabilmenin yanı sıra ilgili fiziksel varlıkların durumunu ve davranışlarını simüle edebilir, izleyebilir, teşhis edebilir, tahmin edebilir ve kontrol edebilirler. Sanal modeller yalnızca geometrik modelleri değil, aynı zamanda malzeme özellikleri, mekanik analiz, sağlık durumu izleme gibi davranışları da içerirler.

Tasarım ve üretim sürecinde sanal modellerin parametreleri üretim hattına aktarılır ve sanal modeller işlenerek gerçek fiziksel ürünlere dönüştürülür. Dijital tespit veya ölçüm yoluyla ürün özellikleri, çalışma durumu ve diğer veriler sanal modellere geri beslenerek iki yönlü bir veri aktarım süreci sağlanır. Dijital ikiz, ürün modellerinin sanal alanda oluşturulmasının yanı sıra dijital modellerin fiziksel alana geri bildirimini sağlayarak kapalı döngülü bir süreç gerçekleştirir. Bu teknoloji sayesinde, veriler sürekli olarak toplanıp biriktirilebilir ve tasarım, imalat, kalite kontrol, MRO gibi tüm süreç hakkında bilgi edinilebilir. Bu veriler ve bilgiler yeniden kullanılmaya ve geliştirilmeye devam edilebilir. Sonuç olarak, dijital ikiz tüm ürün yaşam döngüsü verilerini dinamik olarak algılayarak, depolayarak ve sunarak ürünün yönetimini, takibini ve tutarlılığının korunmasını sağlayabilir.

3. Sanal Alan (Virtual Field)

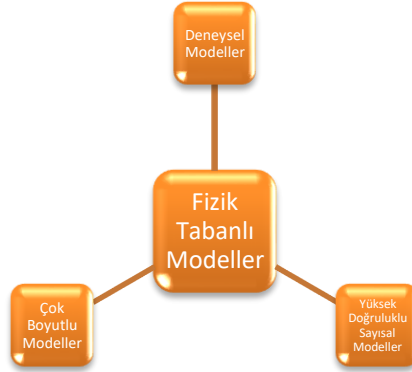
3.1. Analitik Modeller ve Yapay Zeka (Analytical Models and AI)

Dijital ikizin isim kaynağı olan ikizlerden biri sanal alandadır. Sanal kısmın işlevi veriyi toplamak, işlemek ve analiz etmektir. Sanal kısım modellerden oluşmaktadır ve modeller genel olarak iki farklı modeli içermektedir bunlardan biri fizik tabanlı modeller iken diğeri veri tabanlı modeldir.

Fizik tabanlı modeller; deneysel modeller, çok boyutlu modeller ve yüksek doğruluklu sayısal modelleri içerir. Daha iyi anlaşılması açısından bu modeller Şekil 2’de verilmiştir. Veri tabanlı modellerde ise genellikle modelleme oluşturmak için makine öğrenmesi (ML- Machine Learning) kullanılır. Bunun nedeni makine öğrenimindeki mevcut tekniklerin, mühendislere deney ve ön bilgi olmadan daha kısa sürede modelleme yapmasına olanak tanınmasıdır. Bunun aksine fizik tabanlı modeller, mühendislerin mesleki ve matematiksel bilgisine ilişkin belirli gereksinimlere ihtiyaç duyar.

Her iki modelleme de farklı kullanım amaçları için farklı alanlarda kullanılabilir hatta ileriki başlıklardan birinde açıklaması yapılacağı üzere bu iki modelin birlikte kullanımını da mümkündür.

Yapay zekanın gelişimi mühendislik açısından Dİ' nin otomatikleşmesini ve akıllılaşmasını sağlamıştır bu nedenle çoğu Dİ bu teknolojiyi kullanmaktadır. Sanal taraftaki yapay zeka uygulamaları, veriye dayalı analitik model oluşturmak için makine öğrenimini kullanır. Bu modeller; sınıflandırma, kümeleme ve oluşturma görevlerindeki kanıtlanmış performansları nedeniyle teşhis, üretim ve karar vermede yaygın olarak uygulanmaktadır (Li vd., 2021).



Şekil 2: Fizik tabanlı modellerin içerdiği farklı modeller. (Different models included in physics-based models)

3.2. Fizik tabanlı model (Physics base model)

Fizik tabanlı model yaklaşımı, bir fiziksel olguyu sanalda modellemek için denklemleri kullanarak sayısal bir çözüm yapmayı ve bu çözüm üzerinden ilerlemeyi içermektedir. Fizik tabanlı modeller analitik modellerin büyük bir kısmını oluşturur ve çoğunlukla CAD (Computer-Aided Design), Catia, ANSYS, Siemens Nx gibi yüksek doğruluklu yazılımlar tarafından yönetilirler. Kullanım örneği olarak; bu modeller rastgele senaryolar üretebilir, çatlak tespiti ve kalan kullanım ömrü (RUL- Remaining Useful Life) tahmini için uygun senaryoları belirlemek amacıyla ölçülebilir verilerle karşılaştırılabilirler (Li vd., 2021).

Montaj işleyişi gibi bir süreci simüle etmek için de yine süreç ikizleri olarak adlandırılan Dİ'ler kullanılabilir. Bu süreç ikizleri genellikle makine davranış modeli, malzeme modeli ve süreç simülasyon modeli olmak üzere üç tür model içermektedir (Li vd., 2021).

Süreç simülasyon modeli, operatörün izleyebileceği ve kontrol edebileceği süreci simüle etmek için kullanılırken makine davranış modeli, işlemin denetlenmesi ve doğrulanması için kullanılan malzeme modeliyle birlikte çalışarak montaj gibi alanlarda kullanılan robotların ya da üretim hattında kullanılan CNC (computer numerical control)'lerin davranışını temsil etmek için kullanılmaktadır.

3.3. Deneysel ve sayısal modelleme (Experimental and numerical modeling)

Fizik tabanlı yaklaşım, deneysel ve sayısal modelleme olmak üzere iki bölüme ayrılır. Deneysel modelleme yaklaşımında mantık, bir süreci ya da olguyu anlamaktır. Bu nedenle laboratuvarlarda tam ölçekli, ölçeklendirilmiş, doğrudan ölçülemeyen ya da ölçüm yapıldığında fazla maliyet çıkacak durumları gözlemlemek için deneyler yapılır. Daha sonra Dİ'de kullanılacak korelasyonlar veya modeller geliştirilir.

3 boyutlu modelleme, sayısal modellemeye giden ilk basamaktır. Bu bir nesnenin matematiksel temsilinin geliştirilmesi sürecini içerir. 3B modeller, fizik tabanlı modelleme içeren dijital ikizlerde başlangıç noktasıdır. Bu modeller, özel yazılımlar vasıtasıyla denklemler kullanılarak oluşturulabileceği gibi 3B tarama ile de oluşturulabilir ve sonucunda yüzeyler ya da eğriler gibi geometrilerle temsil edilirler. Ayrıca 3B modellerin kalitesi simülatöre girdi sağladığından Dİ için oldukça önemlidir.

3.4. Fizik tabanlı modelin avantaj ve dezavantajları (Advantages and disadvantages of physics base model)

Fizik tabanlı modelleme (PBM- Physics Based Model) yaklaşımlarının avantajlarından bahsedecek olursak, doğa kanunlarına tabi oldukları için genellikle veriye dayalı modellerden daha az yanılırlar. Fiziksel varlığı temsil etmek için kullanılan matematiksel denklemler izlenebilen ve açıklanabilen fizik ilkelerini takip etmektedir. Bu nedenle oluşabilecek hatalar kolaylıkla tespit edilip optimize edilebilir. Ayrıca fizik tabanlı modeller, aynı fizik tarafından yönetilen görünüşte çok farklı problemlere genelleştirilebilirliklerinin yanı sıra oldukça yorumlanabilir (Rasheed vd., 2020).

Bu avantajlara rağmen sınırlamalar ve dezavantajlar da mevcuttur. Örneğin: Daha önceden de bahsedildiği gibi PBM'lerin etkinliğinin ve tasarımının önceden elde edilen mühendislik deneyim ve bilgilerine bağlı olması bir sınırlayıcıdır. Aynı zamanda bu modellerin sayısal istikrarsızlığa yatkın olmaları, hesaplamaların zorlu olması, modelleme ve girdilerdeki belirsizlikten dolayı büyük hatalara sahip olmaları ve geçmiş verileri özümseyecek mekanizmaların bulunmaması gibi durumlarda dezavantaj yaratmaktadır.

3.5. Veri tabanlı model (Data-driven model)

Veri tabanlı model (DDM- Data Driven Model), verileri analiz etmek ve potansiyel değerini ortaya çıkarmak için istatistikleri ve modern bilgi işlem gücünü kullanma kapasitesini temsil eder (Li vd., 2021). Yani DDM'lerin temeli verilerin değişim potansiyelini anlayarak sistemin davranışını tanımlamaktır. Sensör, veri iletimi ve veri depolama teknolojilerinin gelişmesi, bilgi işleme kapasitesinin artması, makine öğreniminin gelişerek uygulamalarının artması gibi nedenlerle DDM kullanımı son zamanlarda artış göstermektedir.

Veri tabanlı modellemede çoğunlukla makine öğrenimi kullanılsa da diğer istatistiksel yaklaşımların da kullanılması mümkündür. DDM'ler, önceden kazanılmış herhangi bir fizik bilgisi olmadan çeşitli verilerden değişkenler arasındaki potansiyel bağlantıları çıkarım yapabildiği için havacılık alanında mühendislerin sistem dinamiklerini tanımlama konusunda sınırlı yeteneğe sahip olduğu karmaşık çalışma koşulları altındaki uçak motorlarında, teşhis ve kompozit imalatı gibi problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Ek olarak üretim hattında da kullanılabilir. Örneğin: Uçak yüzeylerini boyamak için kullanılan püskürtme robotunun veri tabanlı modellemesi. (Qiu vd., 2019) Bunun için detaylı bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Veriye dayalı modeller daha fazla veri (deneyim) ile beslendikçe sürekli gelişim göstermeye devam ederler ve bu onların en önemli avantajlarından biridir. Negatif bir özellik olarak veriye dayalı modeller eğitilirken birtakım karar verme sorunları yaşasa da (öğrenme aşamasında) nihai eğitimini bitirdiğinde bunun üstesinden gelir ve karar vermek için kararlı hale gelir.

3.6. Makine öğrenmesi (Machine learning)

Makine öğrenmesi (ML), bilgisayar bilimi ve yapay zekanın alt alanlarından biridir ve yüksek performanslı bilgisayar teknolojileri tarafından desteklenen DDM'ler olarak kabul edildiği söylenebilir. Temel de makinelerin dünyayı insanlar gibi düşünebilmesi, tahmin edebilmesi ve anlayabilme kabiliyeti

kazanması anlayışına dayanır. Böylece tıpkı insanlar gibi makinelerin de yeni bilgi ve beceriler kazanması, var olan bilgiyi yeniden düzenleyebilmesi beklenmektedir.

ML, belirli bir programlama olmadan, verilen verileri kullanarak bilgisayar sistemlerinin öğrenmesini sağlamak için bazı özel algoritmaları kullanan bir alanı tanımlar (Meng vd., 2020). ML, algoritma ve istatistiksel modellerin bilimsel çalışmasıdır ve sadece verilerden öğrenmeye dayalı bir gelişim gösterir.

ML'yi öğrenme süreçleri geri bildirimlerine göre şu üç farklı şekilde sınıflandırmak mümkündür: denetimli öğrenme (bir öğretici ile öğrenme), denetimsiz öğrenme ve takviyeli öğrenme (Monostori, 2003). Sınıflandırmaların her biri farklı bir işlemi üstlenmektedir.

Denetimli öğrenme açısından bakacak olursak, temelde sınıflandırma ve regresyon (istatistiksel analiz tekniği) görevlerini gerçekleştirirken denetimsiz öğrenme, genellikle gruplama ve tahmin görevlerinde uygulanmaktadır. Takviyeli öğrenme ise planlama ve otonom karar verme için kullanılır. Örnek uygulamalar görmek için denetimli makine öğrenmesi içeren (Alexopoulos vd., 2020) çalışmasına, denetimsiz öğrenme içeren (Uzun vd., 2019) çalışmasına ve takviyeli öğrenme içeren (Andrade vd., 2021) çalışmasına bakılabilir.

3.7. Sensörler (Sensors)

Bilginin kaynağı sensörlerdir ve bunlar donanım ve yazılım sensörleri olarak ele alınabilir (Liu & Mrad, 2014). Süreç izleme ve kontrolünü mümkün kılmak için en yaygın uygulama, sürecin istenilen yerlerinde donanım sensörlerinin kullanılmasıdır (Kadlec vd., 2009). Donanım sensörleri, zorlu çalışma şartlarından dolayı sık servis gerektirmesi, ürün kalitesinin bozulması, ölçümde gecikmeler, erişim gereksinimleri ve yüksek maliyetler gibi birçok nedenden dolayı bazı uygulamalar için uygun değildir. Yukarıda belirtilen nedenlerle bu sensörler kullanıldığı taktirde süreç değişkenlerinin ölçülmesi güçleşir; ölçüm yapılamaz ya da ölçüm gecikmeleri ve süresizlikler meydana gelebilir. Bu da sürecin hatalı ilerlemesine, gecikmesine, zaman kaybına, sürecin tamamen sonlanmasına ya da hatalı ürün üretimi gibi birçok olumsuzluğa neden olabilmektedir.

Bu sorunları çözmek amacıyla, 'ölçülmesi zor' kalite parametrelerini tahmin etmek için süreçlerin matematiksel modellerini kullanılabilmesinin mümkün olup olmadığı düşüncesi üzerine yazılım sensörleri kavramı ortaya çıkmıştır. (Kadlec vd., 2009)'e göre modeller genellikle bilgisayar programları olduğu için "yazılım", modeller donanım benzerleriyle benzer bilgiler sağladığı için "sensör" kelimelerinin birleşimi olan "yazılım sensörü" olarak adlandırılmıştır.

Yazılım sensörleri, bir dizi girdi süreci değişkenini bir kalite parametresine eşleyen matematiksel veya ampirik modellere dayanır. Böylece süreç endüstrilerindeki 'ölçülmesi zor' kalite parametreleri, bir dizi ölçümü kolay girdi süreci değişkeni kullanılarak doğru bir şekilde tahmin edilebilir (Perera vd., 2023). Yazılım sensörleri de kendi içinde sınıflandırılmaktadır. Model odaklı ve veri odaklı olmak üzere temelde iki yazılım sensör kategorisi vardır ancak bu çalışmada konuyu sınırlayabilmek adına bu detaya yer verilmemektedir.

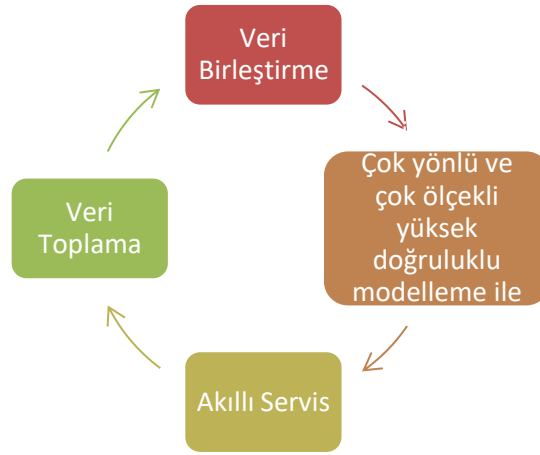
4. Dijital İkiz'de Doğruluk (Fidelity of Digital Twin)

Dijital ikiz kavramının ilk çıkış noktası NASA'dır. NASA'nın oldukça geniş çaplı havacılık ve uzay görevleri olduğu düşünüldüğünde dijital ikizin doğruluğunun hem maliyet açısından hem de görev başarısı açısından oldukça önemli olduğu rahatlıkla söylenebilir.

Dİ'nin amacı, performans tahminini ve optimizasyonunu destekleyebilecek gerçekçi sistem davranışı modelini desteklemektir (Glaessgen & Stargel, 2012) ve uçan ikizinin hayatını yansıtmada son derece

gerçekçi olmalıdır. Bunu yapmak için, fiziksel bir varlık, sensör teknolojileri kullanılarak sanal bir kopyaya bağlanır ve Dİ ürün yaşam döngüsünün tüm aşamalarından büyük miktarda veri toplar (Gao vd., 2022) tutarlı ve kesintisiz teknik bilgi alışverişini ve alanlar arası birlikte çalışabilirliği gerçekleştirir ve aynı zamanda uçak/uzay aracı operasyon riskini azaltır, operasyonunun güvenliğini ve verimliliğini artırır.

Havacılık endüstrisinin Dİ modelinin inşası şu üç temel teknolojiyi içerir: veri birleştirme teknolojisi, çok boyutlu ve çok ölçekli yüksek doğruluklu modelleme teknolojisi ve yeni bilgi teknolojisi (BT) ile birleştirme. Toplanan verilerin yeni BT ve İnsan-Makine Etkileşimi (HMI-Human-Machine Interface) analizi ile birleştirilmesi, çok boyutlu ve çok ölçekli, yüksek doğruluklu modelleme için bir temel oluşturabilir (Xiong & Wang, 2022). Değinen HMI, yeni BT, modelleme teknolojileri anahtar teknolojiler olarak adlandırılmakta ve tüm bu süreçte, havacılık endüstrisi Dİ'lerinin daha iyi ve akıllı hizmetler sunmasını sağlamak için birlikte çalışmaktadırlar. Daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 3'de yaşam döngüsü içinde temel teknolojiler arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 3: Yaşam döngüsü içinde temel teknolojiler arasındaki ilişki (Xiong & Wang, 2022)

Havacılık endüstrisindeki Dİ verileri çok kaynaklı ve heterojen olma özelliğine sahiptir. Bu nedenle veri kalitesinin sağlanması, veri belirsizliğinin azaltılması, veri standartlarının birleştirilmesi, veri kullanılabilirliğinin iyileştirilmesi ve Dİ'in bilgi yönetimi yeteneğinin geliştirilmesi gerekmektedir. Büyük veri, makine öğrenimi ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak veri birleştirmenin verimliliği ve uygulama etkisi artırılmaktadır.

5. Veri Birleştirme Nedir? (What is Data Fusion?)

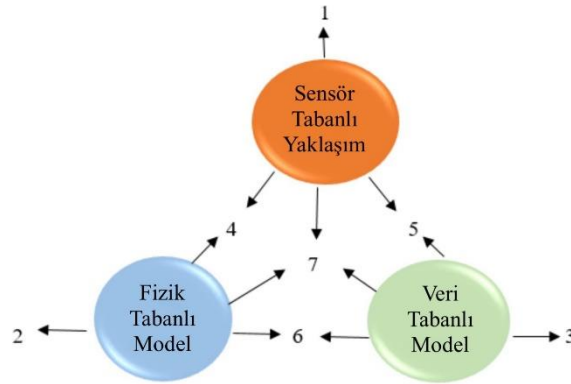
Veri birleştirme, birden fazla kaynaktan gelen veri ve bilgilerin otomatik tespiti, ilişkilendirilmesi, korelasyonu, tahmini ve kombinasyonuyla ilgilenen çok düzeyli, çok yönlü bir süreçtir (Liu & Mrad, 2014). Liu ve Mrad çalışmaları referans alındığında veri birleştirme: sensör seviyesi, özellik seviyesi ve karar seviyesi olmak üzere üç seviyede uygulanabilir.

Birleştirme işlemi; en düşük (sensör) seviyede, sinyalleri doğrulamak ve özellikler oluşturmak için birden fazla sensörden gelen bilgileri birleştirir. Daha yüksek bir seviyede, birleştirme işlemi tanı bilgilerini elde etmek için türetilmiş özellikleri birleştirirken en üst düzeyde, karar verme sürecini

kolaylaştırmak için deneyime dayalı bilgileri veya fiziksel model tahminlerini sinyale dayalı bilgilerle birleştirmektedir.

6. Dijital İkizde Modellemeler Arasındaki İlişki (Relationship Between Models in Digital Twin)

Dİ, mühendislik açısından oldukça yararlı bir kullanım sağlamaktadır. Örneğin çok sayıda komponentin birleşmesinden oluşan uçaklar için bir simülasyon uygulaması düşünüldüğünde, bir uçak kanadının davranışı ve özellikleri parametreler değiştirilerek rahatlıkla gözlemlenebilir ancak uçaklar sadece kanatlardan oluşmamaktadır yani yalnızca kanat analizi yapmak yeterli değildir. Kanatta meydana gelen durumların tüm uçağa etkisinin gözlemlenmesi gerekir ancak bu gözlemi yapmak için simülasyonlar yetersiz kalmaktadır. Bu noktada Dİ kullanımı ile bu soruna çözüm sunulmaktadır.



Şekil 4: Dİ'de modelleme ilişkisi (Liu vd., 2018)

Dİ, tüm alt sistemleri ayrı ayrı çalışarak bu sistemleri bütüne entegre edebilme ya da alt sistemleri de kendi içinde gruplayarak bir alt sistem grubu oluşturma ve bunlar arasındaki etkileşimi bir bütün olarak gözleme imkanı sunmaktadır. Örnek kanat üzerinden verilse de uygulama sadece kanatlar, gövde, motor ya da iniş takımı olarak düşünülmemelidir uçağın her bir komponentinin ayrı ayrı alt sistemlere ve bu alt sistemlerin, nihayetinde tüm sisteme etkisi Dİ sayesinde gözlemlenebilmektedir. Buradan yapılan çıkarımla Dİ ve sistem odaklı tasarımın yakından ilişkilendirilebileceği ve Dİ'nin (Grose, 1994) çalışmasında da belirtilen sistem odaklı tasarımda kullanılarak verimliliği artırabileceği söylenebilir. (Liu vd., 2018) çalışmasında bu üç unsuru veri birleştirme olarak ele alıp açıklasa da bu çalışmada Şekil 4'te verilen ilişkiler Dİ 'de kullanım açısından aşağıdaki gibi açıklanabilir:

1. Sensör tabanlı yaklaşımda veri fiziksel varlıktaki donanım sensörlerinden elde edilmektedir.
2. Dİ, fizik tabanlı modelleme kullanılarak oluşturulur.
3. Dİ, ML kullanılarak veri tabanlı modelleme ile oluşturulur.
4. Fizik tabanlı model kullanılarak oluşturulan modele sensörlerden alınan veri aktarılır, bu şekilde model üzerinde uygulamalar ve değişiklikler yapılabilir. Sensörden alınan veriler PBM'de doğrulama yapmak için kullanılır.
5. Sensörlerden alınan veriler sayesinde oluşturulan bir veri havuzu vardır. Bu havuzdaki veriler tablo şekline getirilir ve ML kullanılarak oluşturulmuş veri tabanlı modelin sürekli gelişmesi için bilgi tablodan çekilir. ML, bilgiden bilgi türetir ve bunlarla bir bağlantı kurarak optimum çözümler ve

doğrulama yapabilme imkanı sunar. Bu noktada ML kullanmak mühendislik açısından hızlı ve kolay karar vermeyi sağlamaktadır.

6. Oluşturulan Dİ’de fizik tabanlı ve veri tabanlı model aynı anda kullanılarak birbirleri ile bilgi alışverişi sağlanır (örn. ML ile öğrenilmiş bilgiyi PBM’de simülasyon aşamasında kullanabiliriz ya da PBM’den elde ettiğimiz bilgileri ML ile işleyerek sürekli karar verme açısından iş yükünü azaltabilir, mühendislik açısından optimum bir çözüm sunmasını sağlayabiliriz. (J. Wang vd., 2022) çalışması bu hibrit kullanıma örnek olarak verilebilir.
7. Bu noktada fizik tabanlı model, veri tabanlı model ve sensör tabanlı yaklaşım aynı anda kullanılarak bir Dİ oluşturulur. Sensörlerden alınan ve toplanan veriler hem PBM’de hem de DDM’de kullanılabilceği gibi PBM’in çıktısı DDM’ye girdi olarak verilebilir ya da tam tersi uygulanabilir.)

Sonuç olarak tüm bunlar havacılıkta istenen yüksek doğruluğa sahip çalışmalar yürütülebilmesine, aynı anda tüm ürünün gözlemlenebilmesine, gerektiğinde müdahalede bulunulabilmesine, aynı zamanda tasarım açısından da eş zamanlı alt sistemlerin tasarlanıp entegre edilerek bütün bir parçanın zamandan ve maddi kaynaklardan tasarruf ederek tasarlanıp üretilmesine olanak tanımaktadır.

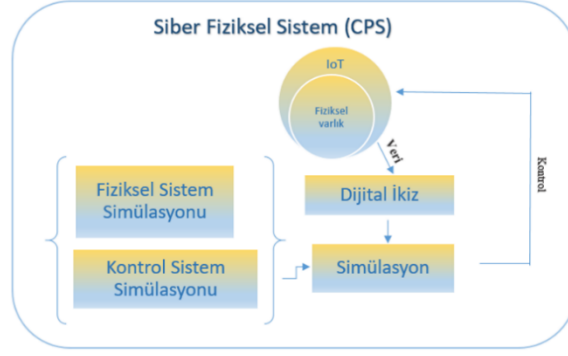
7. Dijital İkiz, CPS, Simülasyon ve IoT (Digital Twin, CPS, Simulation and IoT)

Dijital ikiz teknolojisinde derinleşmek ve daha iyi anlayabilmek için öncelikle dijital ikiz teknolojisine ilişkin temel kavramların belirlenmesi gerekmektedir. Bu noktada dijital ikiz, simülasyon, siber-fiziksel sistemler (CPS- cyber-physical systems), Nesnelerin İnterneti (IoT-Internet of things) gibi kavramlar arasındaki ilişki uçağın dijital ikizi temel alınarak tanımlanmaktadır.

Dijital ikiz, bilgi alanındaki fiziksel varlığın ve aynı fiziksel varlığın varlığının kesin bir şekilde haritalandırılmasıdır ve fiziksel varlığın durumunun değişmesine göre gerçek zamanlı olarak değişir. Simülasyon, bir model oluşturmak ve fiziksel varlığın durumunu önceden simüle etmek ve fiziksel varlığın olası durum değişimini, tepkilerini analiz etmek için mevcut varlığı temel almaktadır. Bu bilgiler ışığında Dijital İkiz ve simülasyon arasında fark olduğu net bir şekilde anlaşılmaktadır.

IoT, verinin aktarılabilceği fiziksel varlıklar arasındaki bağlantıya dayanmaktadır. Bağlantılar, bilgisayar ağlarının ve iletişim protokollerinin uygulanmasıyla mümkün olmaktadır. Bu iletişim tipik ağ protokollerine veya özel protokollere dayanır.

CPS, fiziksel varlıklar arasında bilgi aktarımına, bilgiden bilginin çıkarılmasına ve kontrol komutlarının elde edilmesi ve bu kontrol komutlarının fiziksel varlıklar üzerinde yeniden harekete geçirilmesi için bilgi analizi ve işlenmesinin sonuçlarına dayanmaktadır. Dolayısıyla IoT, CPS'nin uygulanması için altyapı olarak görülebilir.



Şekil 5: CPS, Simülasyon, IoT ve Dijital İkiz arasındaki ilişki (L. Wang, 2020)

Dijital ikiz modeli oluşturmak, fiziksel varlığa dayalı bir avatar gibi sanal beden oluşturmak anlamına gelir. Dijital ikiz, fiziksel varlıkla tam uyum sağlayana kadar fiziksel varlığın şekline ve durumuna yaklaşma sürecinden geçer. Bu kısım modelin simülasyonunu ve fiziksel varlığını kontrol etmek için denetleyiciyi kullanan, fiziksel varlığın çalışma durumunu optimize eden ve otonom karar verme yoluyla dijital ikizin simülasyon ve tahmin sonuçlarına dayanan CPS'deki bilgi sistemine karşılık gelmektedir. Verilen bilgilerin yani CPS, IoT ve Dijital İkiz arasındaki bağıntının daha net anlaşılması için aşağıdaki Şekil 5'e bakılabilir.

Yukarıdaki diyagramdan görülebileceği üzere CPS üç bölümden oluşur: dijital ikiz, simülasyon ve IoT.

1. IoT, temel olarak uçağın fiziksel varlığını ve fiziksel varlık ile dijital ikiz arasındaki iletişimi içerir.
2. Dijital ikiz, fiziksel varlığa dayalı olarak inşa edilir ve fiziksel varlığa karşılık gelen yüksek hassasiyetli bir simülasyon modeline sahip olmalıdır.
3. Simülasyon kısmı dijital ikizin simülasyon tahminine dayanmaktadır.

Dijital ikiz, simülasyon ve IoT'nin birleşimi bir CPS sistemi oluşturmaktadır. Dijital ikiz ve simülasyon, CPS'nin bilgi kısmına karşılık gelirken IoT, CPS'nin fiziksel ve iletişim kısımlarına karşılık gelmektedir. Ayrıca siber-fiziksel sistemlerin günümüzün otonom olma, işlevsellik, kullanılabilirlik, güvenilirlik ve siber güvenlik seviyelerini çok aşan yeni yeteneklere sahip gelecekteki mühendislik sistemlerinin tasarımında ve geliştirilmesinde önemli bir rol oynaması beklenmektedir (Baheti & Gill, 2011).

8. Dijital İkiz Oluşturma Süreci (Creation Process of Digital Twin)

Mevcut bir fiziksel ürün göz önüne alındığında, tamamen işlevsel bir dijital ikiz oluşturmak genel olarak altı adımda gerçekleşir. Sıralanan bu adımların pratikte eş zamanlı gerçekleşebileceği unutulmamalıdır.

8.1. Sanal Temsil Oluşturma (Creating a Virtual Representation)

Dijital ikiz, fiziksel ürün hakkındaki bilgileri ve onun gerçek dünyadaki davranışını mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılan 3 boyutlu dijital temsil ile birleştirmenin bir şekli olarak

kullanılmaktadır. Bu adımda kullanılan teknolojiler bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve 3D modellemedir. Her ikisi de ürün tasarımında yaygın olarak kullanılan teknolojilerdir.

8.2. Tasarımla İlgili Karar Almayı Kolaylaştırmak için Veri İşleme (Data Processing to Facilitate Design Decision Making)

Farklı kaynaklardan (yani esas olarak fiziksel üründen) toplanan veriler analiz edilir, entegre edilir ve görselleştirilir. İlk olarak veri analitiği, verileri tasarımcıların karar verme amacıyla doğrudan sorgulayabileceği daha somut bilgilere dönüştürmek için gereklidir. İkinci olarak, ürün verileri farklı kaynaklardan toplandığı için veri entegrasyonu ile tek bir bileşik görünüm sağlanır. Üçüncüsü, verileri daha açık bir şekilde sunmak için veri görselleştirme teknolojileri dahil edilir. Son olarak, bir Dİ'nin bilişsel yeteneğini (örn. akıl yürütme, problem çözme ve bilgi temsili) geliştirmek için gelişmiş yapay zeka teknikleri dahil edilebilir, bu sayede bazı basit öneriler otomatik olarak yapılabilir.

8.3. Davranışların Simülasyonu (Simulation of Behaviors)

Ürün tasarımında simülasyon teknolojilerinin yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Bu adımda da simülasyon ve sanal gerçeklik (VR-virtual reality) teknolojileri kullanılmaktadır. Simülasyon, fiziksel ürünün sanal dünyadaki temel işlevlerini ve davranışlarını simüle etmek için kullanılır. Öte yandan sanal gerçeklik (VR) teknolojileri, tasarımcılara ve kullanıcılara simüle edilmiş ortamda sanal ürünle doğrudan etkileşime girme imkanı sağlamaktadır.

8.4. Fiziksel Ürüne Komut Verme (Commanding the Physical Product)

Dİ'nin önerilerine dayanarak fiziksel ürün, çeşitli aktüatörler aracılığıyla fiziksel dünyadaki işlevini, davranışını ve yapısını uyarlanabilir şekilde ayarlama yeteneğiyle donatılmıştır. Sensörler ve aktüatörlerin dijital ikizin iki teknolojik omurgası olduğu söylenebilir. Sensörler, dış dünyayı algılamayı sağlarken, aktüatörler Dİ tarafından talep edilen ayarlamaların gerçekleştirilmesini sağlar. Ayrıca sanal ürünün bazı bölümlerinin tekrar fiziksel dünyaya yansıtılması için artırılmış gerçeklik (AR- augmented reality) teknolojileri de kullanılabilir. Örneğin AR, son kullanıcıların ürünlerin gerçek zamanlı durumunu görmesine olanak sağlamaktadır.

8.5. Sanal Ürün ile Bağlantı Kurma (Connecting with the Virtual Product)

Bir ikizin var olduğunu söyleyebilmek için sanal taraf ile fiziksel taraf arasında bağlantının olması şarttır. Bağlantılar ağ iletişimi, bulut bilişim ve ağ güvenliği gibi bir dizi teknoloji kullanılarak sağlanır. Ağ teknolojileri, fiziksel ürünün sanal ürüne güç sağlamak için devam eden verileri buluta göndermesine olanak tanır (Tao vd., 2019). Bulut bilişim, sanal ürünün tamamen bulutta geliştirilmesine, konuşlandırılmasına ve bakımının yapılmasına olanak tanır. Bu, tasarımcıların ve kullanıcıların internet erişimi olan her yerden rahatlıkla erişebilmelerine olanak tanır. Son olarak, ürün verileri doğrudan ve dolaylı olarak kullanıcı-ürün etkileşimleriyle ilgili olduğundan bağlantıların güvenliğinin garanti edilmesi kritik öneme sahiptir.

8.6. Veri Toplama (Collecting Data)

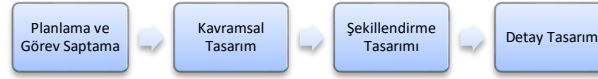
Dİ tarafından işlenmesi gereken ürünle ilgili çeşitli veri tipleri vardır. Fiziksel ürün verileri genellikle çevresel veriler, kullanıcı verileri ve etkileşimli veriler şeklinde bölünür (Tao vd., 2019). Ürün verileri kullanıcı geri dönüşlerini içerir. İnteraktif veriler, stres, titreşim vb. gibi kullanıcı-ürün-çevre etkileşiminden oluşur. Sensör teknolojisi ve IoT teknolojisi kullanılarak yukarıdaki verilerden bazıları

gerçek zamanlı olarak toplanabilir ve analiz edilebilir. Toplanan veriler, daha işlevsel sanal ürün oluşturmaya yönelik döngüyü besler ve döngünün başlangıcına dönlür.

9. Dijital İkiz Odaklı Ürün Tasarımının Yapısı (Structure of Digital Twin Focused Product Design)

Dijital ikiz bir kere başarılı bir şekilde oluşturulduktan sonra tasarımcıların farklı tasarım faaliyetlerini gerçekleştirmesine altyapı sağlayabilir. CIRP'nin (Nee and Ong 2013) tasarım teorisi ve metodoloji (DTM- design theory and methodology) sınıflandırmasına göre DTM, yeni çözümler üretme, tasarım çözümlerinin işlevsel bilgilerini zenginleştirme ve tasarım bilgisini temsil etme rollerini oynar. Yaratıcılığa, kombinasyona ve modifikasyona dayalı olarak yeni çözümler üretilir (Tomiyama vd., 2009).

Dİ'nin en çok kombinasyon tabanlı tasarımda faydalı olması beklenmektedir. En sık kullanılan kombinasyona dayalı DTM, Pahl ve Beitz (Tao vd., 2019) tarafından önerilen ve tasarım sürecini dört aşamaya ayıran sistemik tasarım yaklaşımıdır. Bunlar; görevin saptanması, kavramsal tasarım, cisimleştirme tasarımı ve detay tasarımıdır. Her aşama ayrıca birden fazla alt aşamaya bölünebilir. DTPD (digital twin-driven product design), sanal bir model oluşturmak için verilerden tam olarak yararlanma yeteneğini tanımladığından, tasarım sürecinin son aşaması olarak sanal doğrulama adı verilen özel bir tasarım aşamasının uygulanması önerilmektedir. Fazlar Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6: DTPD'nin yapısı

(Mayda & Börklü, 2008) çalışmalarında DTPD'in dört fazı aşağıdaki gibi açıklanmıştır :

- Amacın netleştirilmesi (Planlama ve Görev Saptama): İyi bir tasarım problem tanımının (ihtiyaç listesi veya tasarım şartnamesi) yapılabilmesi için gerekli tüm bilgilerin derlenmesi,
- Kavramsal tasarım: Bazı farklı tasarım çözüm kavramları (tasarım alternatifleri) oluşturma ve aralarından bir veya birkaçının seçilmesi,
- Şekillendirme tasarımı: Seçilen çözüm kavramların geliştirilmesi, tasarım oluşum ve ön imalat işlemlerinin belirlenmesi,
- Ayrıntılı tasarım: Geometrik şekil, boyutlar, yüzey pürüzlülüğü, toleranslar ve parçalara ait diğer imalat özelliklerle birlikte genel montaj yapısının belirlenmesi.

Önerilen DTPD yapısı ilgili tasarım teorisini ve metodolojisini (DTM), veri yaşam döngüsü yönetimini (DLM- data lifecycle management) ve dijital ikizi bütünleştirir. DTPD mevcut DTM'lere dayalı olarak gelişir. Tasarım sürecini yapılandırmak ve çeşitli tasarım faaliyetleri için farklı türdeki verilerin nerede, nasıl ve ne şekilde kullanılacağına karar vermek için dahil edilirler. Ayrıca DTM'ler, tasarım faktörleri arasındaki ilişkiyi koordine etmeye yardımcı olan çeşitli tasarım aşamalarını açıklar. Tasarım süreci giderek dijital hale gelir. DTPD, çok büyük miktarlardaki tarihsel ve gerçek zamanlı verilere bağlıdır. DLM, ürünün yaşam döngüsü boyunca verilerle ilgilenir ve fiziksel dünyadan geçmişten verileri toplayabilir, aktarabilir, saklayabilir. Ayrıca, farklı veri türlerinin iletişimini ve

Orta Ömür (OÖ) bilgisini temsil eden dijital ürün avatarlarının kullanılmasına yönelik bir konsept ortaya sunmaktadır. Aynı zamanda Dİ, tasarımın sanallaştırılmasını artırmak için kullanılır, bu sayede gerçek ürüne gerek duyulmadan tasarım hızlı bir şekilde sürdürülebilir. Ma ve ark. (2019), ürün yaşam döngüsünde Dİ ile geliştirilmiş bir insan-makine etkileşimi yapısı önermektedir. Bu araştırmadan kavramsal tasarım aşamasında tasarımcı ve ürün arasındaki etkileşimin olduğu gözlemlenmektedir. Ek olarak simüle edilmiş dijital dünyada tasarımcılar AR/VR teknolojileriyle sanal modeli görebilir, dokunabilir veya kullanabilir (Lo vd., 2021).

10.1.2. Detay tasarım (Detail design): Ürün performansı, malzeme özellikleri, üretim süreci vb. bu aşamada dahil edilir ve belirlenir. Ürün fonksiyon tasarımı ve malzeme seçimi için Gusev ve ark. sistem, fonksiyon ve yapı seviyelerinde parametre seçimini simüle etmek ve optimize etmek için PLM'den alınan verilere dayanarak, Dİ kullanarak optimizasyon yaklaşımını İnsansız Hava Aracı (İHA) özelinde sunmaktadır (Lo vd., 2021). Başka bir çalışmada yine tasarım özelinde en uygun malzemeyi seçebilmek amacıyla, kullanılması düşünülen malzemelerin özelliklerini simüle edip optimize edebilen ve tahmin edilen özellikleri beklenen özelliklerle yinelemeli olarak karşılaştıran Dİ odaklı bir yaklaşım kullanıma sunulmaktadır (Xiang vd., 2019).

10.1.3. Tasarım doğrulaması (Design verification): Tasarımcı tasarladığı ürünlerdeki hataları, arızaları fark etmek ve bunları gidermek durumundadır. Bu nedenle bu aşamada tasarım doğrulama, test ve sanal bir prototip oluşturma gibi ürün tasarımında Dİ'nin kullanılmasına odaklanılmaktadır. Yani Dİ, ürün tasarımı aşamasında süreç zincirinin doğruluğu ve şekil değişikliklerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Zamandan tasarruf etmek amacıyla zaman alıcı doğrulama süreçlerinin yerine simülasyon, sanal alanda başlatılmakta ve yürütülmektedir. (Patrikeev vd., t.y.) çalışmalarında, tasarım doğrulamasında zamandan ve maliyetten tasarruf etmek amacıyla gerçek testlerin sayısını azaltmak için bir dizi simülasyon (statik sertlik ve dinamik sertlik) gerçekleştirerek (SUV- sport utility vehicle) SUV'un Dİ'nin kullanımını göstermektedir.

10.1.4. Yeniden tasarlama (redesign): Bu aşamada Dİ, eksikliklerin giderilmesi ya da tasarımın geliştirilmesi ve ürünün iyileştirilmesine yardımcı olmak amacıyla kullanılır. (Tao vd., 2019) mevcut ürünün yeniden tasarım sürecini optimize etmek için Dİ odaklı bir ürün tasarım yapısı önermektedir. Bu çerçevede sanal alan, fiziksel alandan verileri sürekli olarak toplar, analiz eder ve biriktirir. Bu veriler, süreçlerin iyileştirilebilmesi için ürünlerin tasarlanması veya yeniden tasarlanması için uygulanabilir (Lo vd., 2021).

Dİ, tek tek bileşenlerin üretiminden komple montaja kadar tüm üretim sisteminin simülasyonunu, optimizasyonunu ve ayrıntılı görselleştirilmesini sağlar. Üretim planlama ve kontrol, bakım, yerleşim planlaması, lojistik ve ürün yaşam döngüsü konularına odaklanır.

10.2. Üretim Sonrası Dijital İkiz (Post-Production Digital Twin)

Üretim sonrasında Dİ, üretim aşamasını geçmiş sistemler için, malzemenin nitelik ve nicelik şartnamesini, kalite verilerini, teknik durum verilerini, lojistik verileri, denetim verilerini, ürün kullanım verilerini, bakım verilerini, ürün kullanım süreci izleme verilerini, ürün sağlığı tahmini ve analiz verilerini, üretim ilerleme verilerini ve ürün hurda verileri, ürün geri dönüşüm verileri de dahil olmak üzere tüm bu verileri kullanarak ekiplerin olası senaryolar altında gelişmiş sanal sistem dinamiklerin değerlendirilmesine, tasarım hassasiyetlerinin tespit edilmesine, optimizasyon sağlanmasına ve test hatalarının çözülmesine yardımcı olur. Ekipler gerçekçi ve beklenmedik olayları Dİ yardımıyla simüle ederek, çalışabilirliği iyileştirebilir ve etkileşimli, gerçekçi ortamlarda yüksek kaliteli yenilikler sağlayabilir.

10.3. Hizmet İçi Sistem İkizleri (In-Service System Twins)

Sürdürülebilir ikiz, hizmette olan sistemlerin tahmine dayalı analitiğini ve bakımını yönetir. Ekipler, sistem performansını optimize etmek, ideal bakım rutinleri belirlemek, anormallik tespitine dayalı öngörülerde bulunmak ve daha fazlasını gerçekleştirmek için sensörler vasıtasıyla gerçek zamanlı veri akışı analitiğinden ve makine öğreniminden yararlanabilir. Bu yetenek, sistem durumu hakkında hızlı ve gerçek zamanlı bilgiler sunarak kuruluşların sistem ömrünü en üst düzeye çıkarmak ve arızaları önlemek için en uygun operasyonel ayarlamaları yapabilmelerine yardımcı olur. Örneğin operasyondaki bir uçakta hasar tespiti için, (Seshadri & Krishnamurthy, 2017) uçak yapısal sağlık yönetimi için dijital ikize dayalı bir hasar karakterizasyon yöntemi önerir; bu yöntem, hasarın konumu, boyutu ve yönünü tahmin etmede büyük başarı göstermektedir.

11. Havacılıkta Dijital İkizin Avantajları (Advantages of Digital Twin in Aviation)

Tüm rapor boyunca dijital ikiz incelenirken aynı zamanda Dİ'in avantajlarına dair de fikirler sunuldu burada kısaca toparlayacak olursak havacılık alanı için düşünüldüğünde;

- Uçan bir aracın sanal bir örneği olan Dijital İkiz'in, uçan fiziki ikizinin deneyimlediği her olayı aynı şekilde deneyimleyebilmesi,
- Belirli bir fiziksel aracın yaşamını, durumunu yansıtmaya yeteneği nedeniyle dijital ikizin sertifikasyon, filo yönetimi ve sürdürülebilirlik gibi alanlarda kullanılması,
- Araç görevdeyken dijital ikizin, bozulmaları ve anormal olayları sürekli olarak izleme ve azaltma yeteneği nedeniyle uçan aracın güvenilirliğini artırması,
- Bir aracın uçuşu sırasında meydana gelebilecek olası değişikliklerin sonuçlarına ilişkin doğru kararlar alınmasına olanak tanınması,
- Fiziksel ürün üretilmeden önce sanal ortamda hesaplamalarının, testlerinin vb. yapılarak üretimde, tasarımda ya da herhangi bir adımda yapılacak hatadan dolayı maliyeti azaltmaya imkan sağlaması,
- Dijital ikizlerin, veri analitiği, makine öğrenimi ve yapay zeka gibi ek yazılım tabanlı yeteneklerin sunulmasıyla, IoT ortamından maksimum verimlilik için yararlanılmasının önü açması ve böylelikle tasarım ekiplerine herhangi bir fiziksel çıktıdan önce yapılandırılmalarda ince ayarlar yapabilmelerine olanak sağlaması, başlıca sayabileceğimiz avantajlarındandır.

12. Sonuç (Conclusion)

Dijital ikiz, fiziksel olarak var olan varlığın sanal alanda birebir temsilidir. İki varlığın arasındaki bağlantı gerçek zamanlı bilgi aktarımını içermektedir. Bu gerçek zamanlı bilgi aktarımının, dijital ikizi simülasyondan ayıran en temel özellik olduğu söylenebilir. Simülasyonlar fiziksel ürün üretilene kadar ürün davranışını tahmin etmek için ürünü simüle etmeye yararlar ancak fiziksel ürün var olduğu anda işlevselliğini yitirirler bu noktada Dİ fiziksel varlık ile bağımlı koparmadan gerçek zamanlı olarak fiziksel ürünün şartlarını dijital ikize ileterek aynı şartları deneyimlemesini sağlamaktadır.

Dİ'nin kabiliyetleri yalnızca bununla sınırlı değildir, kullanım amacına göre değişen tasarım aşamasından ürün ömrünün tamamlandığı aşamaya kadar izleme, teşhis etme, tahmin ve kontrol gibi amaçlarla geniş bir alanda kullanımı mevcuttur. Dİ geliştirme çalışmaları hala devam etmektedir ve

günümüzde tasarım alanında kullanımı henüz yaygınlaşmamıştır. Oysa Dİ'in tasarım aşamasından itibaren kullanılması ile bir ürün üretim hattına girmeden tüm yaşam döngüleri sanal alanda deneyimlenebilir erken fazda hatalar düzeltilebilir ya da iyileştirmeler yapılabilir. Bu da üretici için maliyetin ciddi anlamda düşmesine, tasarımcı için daha rahat bir çalışma alanı oluşturulmasına, müşteri için istediği revizyon ya da ek isteklere daha çabuk geri bildirim verilmesine olanak tanımaktadır. Dİ yaşam döngüsünün ne kadar erken aşamasında olaya dahil edilebilirse o kadar verim artışı gözlemlenebilir (Örn. tasarım aşaması). Ki yüksek maliyetli ürün çıktısı olan ve güvenliğin gereklilikler listesinde birinci sırada olduğu havacılık alanında Dİ kullanımı tasarım hattından ürünün hurdaya çıktığı son evreye kadar sürece entegre edilebilirse maliyet ve güvenlik alanında büyük bir atılım yapılacağı öngörülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada Dİ odaklı ürün tasarımı detaylandırılmak suretiyle ürün yaşam döngüsünde Dİ kullanımına yer verilmektedir.

Konunun daha net anlaşılabilmesi için “Dİ nedir?”, “Neden Dİ kullanımıyla ilgileniyoruz?”, “Dİ'nin avantajları nelerdir?”, “Dİ neleri içerir ve nelerden oluşur?” gibi akla gelebilecek soruların cevapları verilmeye özen gösterilmiştir. Genel bilgilerden yola çıkılarak konu özelleştirilmiş ve bu çalışmanın daha sonra yapılacak tasarım çalışmalarına temel oluşturması hedeflenmiştir.

13. Kısaltmalar

ABD: Amerika Birleşik Devletleri

AFRL: Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı

AR: Artırılmış Gerçeklik

BT: Bilgi Teknolojisi

CAD: Bilgisayar Destekli Tasarım

CNC: Bilgisayar Destekli Nümerik Kontrol

CPS: Siber-Fiziksel Sistemler

DDM: Veri Tabanlı Model

Dİ: Dijital İkiz

DLM: Veri Yaşam Döngüsü Yönetimi

DTM: Tasarım Teorisi ve Metodoloji

DTPD: Dijital İkiz Tabanlı Ürün Tasarımı

HMI: İnsan-Makine Etkileşimi

IoT: Nesnelerin İnterneti

İHA: İnsansız Hava Aracı

MRO: Bakım, Onarım ve Revizyon

NASA: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi

PBM: Fizik Tabanlı Model

PLM: Product Lifecycle Management

RUL: Kalan Kullanım Ömrü

SUV: Sportif Arazi Aracı

VR: Sanal Gerçeklik

Kaynakça

Alexopoulos, K., Nikolakis, N., & Chryssolouris, G. (2020). Digital twin-driven supervised machine learning for the development of artificial intelligence applications in manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(5), 429-439. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1747642>

Allen, B. D. (2021). *Digital twins and living models at NASA*. Digital Twin Summit.

Andrade, P., Silva, C., Ribeiro, B., & Santos, B. F. (2021). Aircraft maintenance check scheduling using reinforcement learning. *Aerospace*, 8(4), 113.

Attaran, M., & Celik, B. G. (2023). Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 100165.

Baheti, R., & Gill, H. (2011). Cyber-physical systems. *The impact of control technology*, 12(1), 161-166.

BENGÜ, H., & FİDANCAN, C. (2021). MALİYET DÜŞÜRME YÖNTEMİ OLARAK DİJİTAL İKİZ VE OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDEKİ YERİ. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 3(2), 205-221.

Gao, Z., Paul, A., & Wang, X. (2022). Guest editorial: Digital twinning: Integrating AI-ML and big data analytics for virtual representation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(2), 1355-1358.

Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). *The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles*. 1818.

Grieves, M. (2014). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*, 1(2014), 1-7.

Grose, D. (1994, Eylül 7). Reengineering the aircraft design process. *5th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*. 5th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Panama City Beach, FL, U.S.A. <https://doi.org/10.2514/6.1994-4323>

Hribernik, K., Wuest, T., & Thoben, K.-D. (2013). *Towards product avatars representing middle-of-life information for improving design, development and manufacturing processes*. 85-96.

Kadlec, P., Gabrys, B., & Strandt, S. (2009). Data-driven soft sensors in the process industry. *Computers & chemical engineering*, 33(4), 795-814.

Li, L., Aslam, S., Wileman, A., & Perinpanayagam, S. (2021). Digital twin in aerospace industry: A gentle introduction. *IEEE Access*, 10, 9543-9562.

Liu, Z., Meyendorf, N., & Mrad, N. (2018). *The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin*. 020023. <https://doi.org/10.1063/1.5031520>

Liu, Z., & Mrad, N. (2014). *Data fusion for the diagnostics, prognostics, and health management of aircraft systems*. 389-399.

Lo, C. K., Chen, C. H., & Zhong, R. Y. (2021). A review of digital twin in product design and development. *Advanced Engineering Informatics*, 48, 101297. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101297>

Mayda, M., & Börklü, H. R. (2008). *YENİ BİR KAVRAMSAL TASARIM İŞLEM MODELİ*.

Meng, T., Jing, X., Yan, Z., & Pedrycz, W. (2020). A survey on machine learning for data fusion. *Information Fusion*, 57, 115-129. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.001>

Monostori, L. (2003). AI and machine learning techniques for managing complexity, changes and uncertainties in manufacturing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(4), 277-291. [https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(03\)00078-2](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(03)00078-2)

Patrikeev, A., Tarasov, A., Borovkov, A., Aleshin, M., & Klyavin, O. (t.y.). *NVH ANALYSIS OF OFFROAD VEHICLE FRAME. EVALUATION OF MUTUAL INFLUENCE OF BODY-FRAME SYSTEM COMPONENTS*.

Perera, Y. S., Ratnaweera, D. A. A. C., Dasanayaka, C. H., & Abeykoon, C. (2023). The role of artificial intelligence-driven soft sensors in advanced sustainable process industries: A critical review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 121, 105988. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105988>

Qiu, S., Liu, S., Kong, D., & He, Q. (2019). Three-dimensional virtual-real mapping of aircraft automatic spray operation and online simulation monitoring. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 1(6), 611-621.

Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access*, 8, 21980-22012. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>

Segovia, M., & Garcia-Alfaro, J. (2022). Design, Modeling and Implementation of Digital Twins. *Sensors*, 22(14), 5396. <https://doi.org/10.3390/s22145396>

Seshadri, B. R., & Krishnamurthy, T. (2017). *Structural health management of damaged aircraft structures using digital twin concept*. 1675.

Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S. C.-Y., & Nee, A. Y. (2019). Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3935-3953.

Tomiyaama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., & Kimura, F. (2009). Design methodologies: Industrial and educational applications. *CIRP annals*, 58(2), 543-565.

Uzun, M., Demirezen, M. U., Koyuncu, E., & Inalhan, G. (2019). *Design of a hybrid digital-twin flight performance model through machine learning*. 1-14.

Wang, J., Li, Y., Gao, R. X., & Zhang, F. (2022). Hybrid physics-based and data-driven models for smart manufacturing: Modelling, simulation, and explainability. *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 381-391. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.004>

Wang, L. (2020). Application and development prospect of digital twin technology in aerospace. *IFAC-PapersOnLine*, 53(5), 732-737.

Wu, J., Yang, Y., Cheng, X., Zuo, H., & Cheng, Z. (2020). The Development of Digital Twin Technology Review. *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, 4901-4906.

<https://doi.org/10.1109/CAC51589.2020.9327756>

Xiong, M., & Wang, H. (2022). Digital twin applications in aviation industry: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *121*(9-10), 5677-5692.