



HAVACILIK ALANINDA ÜRÜN YAŞAM DÖNGÜSÜ YÖNETİMİ VE DİJİTAL İKİZ BAĞLANTISININ DEĞERLENDİRİLMESİ

İsmail DEMİRCAN*

TUSAŞ - Türk Havacılık ve Uzay Sanayi (Fethiye Mahallesi, Havacılık Bulvarı No:17 06980
Kahramankazan Ankara)

ORCID No : <https://orcid.org/0009-0008-4905-927X>

Anahtar Kelimeler

Öz

Dijital ikiz, ürün yaşam döngüsü (PLM), tasarım dijital ikizi, üretim dijital ikizi, performans dijital ikizi

Günümüzde, endüstride dijital dönüşüm giderek daha önemli hale gelmektedir, ürünlerin daha kompleks hale gelmesi, ürün geliştirme süreçlerinin hızlandırılıp maliyetlerin azaltılmaya çalışılması, Dijital İkiz'ler ve simülasyonların önemini arttırmaktadır. Dijital İkiz'in artan değeri, havacılık endüstrisindeki kuruluşları araştırma ve geliştirme çalışmalarında Dijital İkiz'i aktif olarak kullanmaya teşvik etmektedir. Ancak birçok firma, Dijital İkiz oluşturma sürecinde kullanılan teknolojilerin avantajları ve dezavantajları konusunda hemfikir olamadıklarından nereden başlanacağı konusu henüz netlik kazanmamıştır. Bu makale okuyucularına havacılık alanında bir inceleme sunarak mevcut durum hakkında genel bir bakış sağlamaktadır. Makalede öncelikle Dijital İkiz kavramı, bu kavramın gelişim süreci ve yapılan çalışmalar incelenmiş, havacılık alanında faaliyet gösteren şirketler için Dijital İkiz oluşturulmasının ürün geliştirme sürecine etkisine değinilmiştir. Çalışmanın son bölümünde Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (Product Lifecycle Management veya kısaca PLM) sistemlerinin Dijital İkiz oluşturma sürecine katkısı ve ürün geliştirme süreçlerinde şirketlere sağladığı avantajlar değerlendirilmiştir.

* idemircan@tai.com.tr

doi : 10.46399/muhendismakina.1464112

EVALUATION OF PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT AND DIGITAL TWIN INTEGRATION IN AVIATION FIELD

Keywords

Digital twin, product lifecycle management (PLM), design digital twin, manufacturing digital twin, performance digital twin

Abstract

In today's world, digital transformation is becoming increasingly crucial in industry. The Digital Twins and simulations become much more important with growing complexity of products, the need to accelerate product development processes while reducing costs. The increasing value of Digital Twins is prompting organizations in the aviation industry to actively utilize them in research and development efforts. However, due to the idea of difficulties of using Digital Twins in the industries, product developers don't have a clear idea where to begin. This article provides readers with a general overview of the current situation by offering an examination of the aviation sector. Initially, the concept of Digital Twin, its evolution, and relevant studies are explored, followed by an examination of the impact of creating Digital Twins for companies operating in aviation on the product development process. The final section of the study evaluates the contribution of Product Lifecycle Management (PLM) systems to the process of creating Digital Twins and the advantages they provide to companies in product development processes.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 03.04.2024

Kabul Tarihi : 10.10.2024

Research Article

Submission Date : 03.04.2024

Accepted Date : 10.10.2024

Extended Abstract

Introduction

The aircraft design process typically requires a multidisciplinary approach, integrating the disciplines of engineering, technology, and industrial design. This process is continually evolving, facilitating the emergence of more efficient and innovative aircraft through the integration of new technologies and methods. Presently, the tracking and connections of these processes are being attempted through the use of Product Lifecycle Management (PLM) software. Through this connection, the scope of any problem at any location can be determined, and which points need improvement can be identified retroactively. Due to increased competitive conditions, there is a desire within the aviation industry to rapidly bring products to market and create cost advantages. Therefore, alongside PLM systems, the concept of the Digital Twin is also emphasized.

Objectives

This work is prepared to explain the concepts of Digital Twin and PLM, their uses, and benefits in the aviation industry. A Digital Twin is a digital replica of a physical object or process in the real world. It is used to predict the exact specifications, behaviors, and performance of an object or process. Digital Twins facilitate cost reduction functions through simulations. Nowadays, many tests can be conducted through digital models, allowing numerous tests in the aviation field to be performed without the need for a physical model. Through these tests, design optimization can be swiftly achieved, leading to the production of the most mature design. Similarly, simulating production processes with Digital Twins increases efficiency, while real-time data analysis accelerates error detection and correction. After product delivery, maintenance and repair processes can be optimized using Digital Twins. Lastly, Digital Twins contribute to in-house efficiency through training.

The increasing power of simulation technologies and the use of High-Performance Computing (HPC) systems have elevated the importance of creating Digital Twins by yielding results very close to those obtained from real models in many tests. These tests have shortened design period and production processes and significantly reduced costs.

Digital Twins evolve alongside real systems throughout their entire lifecycle and integrate existing information. They not only describe behavior but also derive solutions for real systems, optimizing their behavior throughout operation and service. For a Digital Twin to function at the desired level of efficiency, the entire process needs to be within a network or Digital Thread. This enables access to the source of problems and facilitates which needs adjustments. Structures providing this Digital Thread are also facilitated by PLM systems.

Product Lifecycle Management (PLM) manages processes from product design to the end of its lifecycle. PLM plays a significant role in product design and development,

aiding in the digitalization of the entire process and increasing efficiency. In product design, PLM enables collaboration among designers and engineers by providing a solution and sharing design data. It facilitates connections between processes, allowing all stakeholders to access the same data and accelerating decision-making processes. Thus, design changes, production updates, or service requests can be swiftly communicated to other processes for proper management.

In PLM processes, substantial benefits are derived from digital data. The digital replica of the product enables the simulation of processes in a digital environment, pre-determining problems in processes and providing access to the source of the problem through the Digital Thread. Digital Twins are utilized at every stage of PLM process, but it wouldn't be accurate to express the Digital Twin throughout the entire process under a single concept. To better understand the concept of Digital Twins, all structures reflecting the behavior of the physical product in every process need to be evaluated as Digital Twins.

The 3D models used from the ideation stage to production represent the Design Digital Twin, digital factory simulations simulating production processes represent the Production Digital Twin, and data simulating maintenance activities and operational processes after product delivery constitute the Performance Digital Twin. Although PLM and Digital Twin individually provide numerous benefits, their combined management creates a much more efficient product management system.

Conclusion

This study emphasizes the importance of Digital Twins in the aviation industry and their critical role in Product Lifecycle Management (PLM) systems. The fact that scattered data can reduce traceability underscores the importance of structuring the entire Digital Twin framework within the PLM platform and consolidating data in a common system. The integration of PLM systems with Digital Twins enables companies to access faster and more reliable information throughout the lifecycle of their products, make quicker decisions, and manage their processes more effectively. As a result, this integration has the potential to enhance companies' competitive advantages by improving product quality and customer satisfaction.

1. Giriş

Hava aracı tasarım süreci genellikle beş adımda gerçekleşir. Öncelikle ihtiyaç anlaşıldıktan sonra gereksinimler teknik kısıtlamalar belirlenir bu aşamada kavramsal tasarımlar yapılır Daha sonra belirlenen gereksinimler doğrultusunda da bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli mühendislik (CAE) yazılımları kullanılarak, hava aracının üç boyutlu (3B) modelleri oluşturulur ve çeşitli senaryolarda simülasyonları yapılır. Tasarım onaylandıktan sonra, bir prototip üretimi yapılır. Bu prototip, tasarımın gerçek dünya koşullarında performansını test etmek için kullanılır. Prototip testleri genellikle aerodinamik testler, yapısal dayanıklılık testleri, motor performans testleri ve uçuş testleri gibi çeşitli alanlarda gerçekleştirilir. Bu testler, tasarımın hedeflenen performansı sağlayıp sağlamadığını belirlemek için kritik öneme sahiptir. Prototip testlerinin başarılı olması durumunda, hava aracı sertifikasyon sürecine geçer. Sertifikasyon süreci, ilgili otoriteler tarafından hava aracının güvenliğini ve uygunluğunu doğrulamak için yapılan kapsamlı testler içerir. Sertifikasyon sürecinin tamamlanmasının ardından, seri üretime geçilir ve hava aracı piyasaya sunulur. Hava aracı tasarım süreci, üretimin ve teslimatın ardından da devam eder. Hava aracının kullanımı sırasında bakımı ve destek hizmetleri sürekli olarak sağlanmalıdır. Bakım ve destek hizmetleri sürekli olarak sağlanmalıdır; bu, hava aracının güvenliğini, verimliliğini ve görev performansını korumak için önemlidir. Belirtilen süreç, Şekil 1'de özetlenmiştir.



Şekil 1. Hava Aracı Proje Süreci

Hava aracı tasarım süreci genellikle multidisipliner bir yaklaşım gerektirir ve mühendislik, teknoloji ve endüstriyel tasarım disiplinlerini bir araya getirir. Bu süreç, sürekli olarak geliştirilmekte ve yeni teknolojilerin ve yöntemlerin entegrasyonu ile daha verimli ve yenilikçi hava araçlarının ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Günümüzde PLM yazılımları kullanılarak bu süreçlerin takibi ve bağlantıları yapılmaya çalışılmaktadır. PLM sistemleri, süreçlerdeki problemin etki alanını belirlemekte ve geriye dönük olarak iyileştirme noktalarını tespit etmeye yardımcı olmaktadır. Artan rekabetçi koşullar nedeniyle havacılık endüstrisinde ürünlerin hızlı bir şekilde pazara sunulmak istenmesi ve maliyet avantajının oluşturulması için PLM sistemleri ile birlikte Dijital İkiz kavramı da ön plana çıkmaktadır.

2. PLM ve Dijital İkiz Nedir?

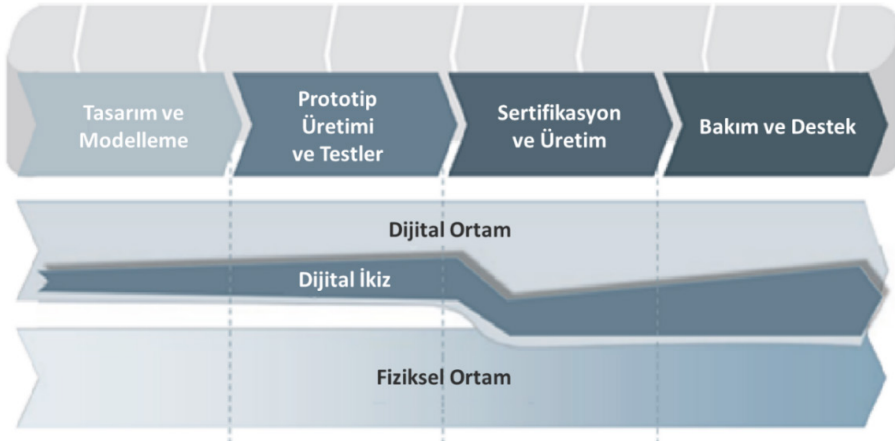
Bu makale hazırlanırken PLM ve Dijital İkiz kavramları hakkında yazılmış maka-

leler araştırılmış, konunun daha iyi açıklanabilmesi için bu makalelerden alıntılar yapılmıştır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2.1 Dijital İkiz

Dijital İkiz, gerçek dünyadaki bir nesnenin veya sürecin dijital bir kopyasıdır. Dijital İkiz kavramı, fiziksel bir varlığın dijital temsili ve hatta daha fazlası olarak tanımlanmaktadır (Mercimek ve Geçkil, 2021). Bir Dijital İkiz, nesnenin veya sürecin tam özelliklerini, davranışlarını ve performansını öngörmek için kullanılır. Bu teknoloji, özellikle üretim sektöründe yaygın olarak kullanılmakta olup, üretim süreçlerinde gerçek zamanlı üretim çizelgeleme gibi alanlarda etkin bir şekilde uygulanmaktadır (Bal, Gevrek ve Demir 2022). Dijital İkiz'ler, gerçek dünyadaki nesnelerin veya süreçlerin daha iyi anlaşılmasına, optimize edilmesine ve gelecekteki sonuçların simülasyonuna yardımcı olmak amacıyla kullanılmaktadır (Mete, 2023). Dijital İkiz, sanal süreç tanımını da içermeli ve en önemlisi uçtan uca, ürünün yaşam döngüsü boyunca karşılaşıcağı tüm fiziksel koşulları sanal olarak oluşturmalıdır. Bu hedefe ulaşıldığında, Dijital İkiz, şirketlere yeni gelir kaynakları ve iş fırsatları sağlayan yeni iş modelleri oluşturabilir. Şekil 2 de belirtildiği gibi Dijital İkiz, fikir aşamasında itibaren ortaya çıkar ve ürün yaşamı boyunca ürün ile birlikte gelişir ve yaşamını sürdürür.



Şekil 2. Dijital İkiz, Süreç ve Fiziksel Ortam İlişkisi (Li, Aslam, Wilwan ve Perinpanayagam, 2021)

Dijital İkiz'lerin birçok avantajı vardır.

Performans İzleme ve Analiz: Dijital ikizler, hava araçlarının performansını gerçek zamanlı olarak izlemeye olanak tanır. Bu, uçakların motor performansından

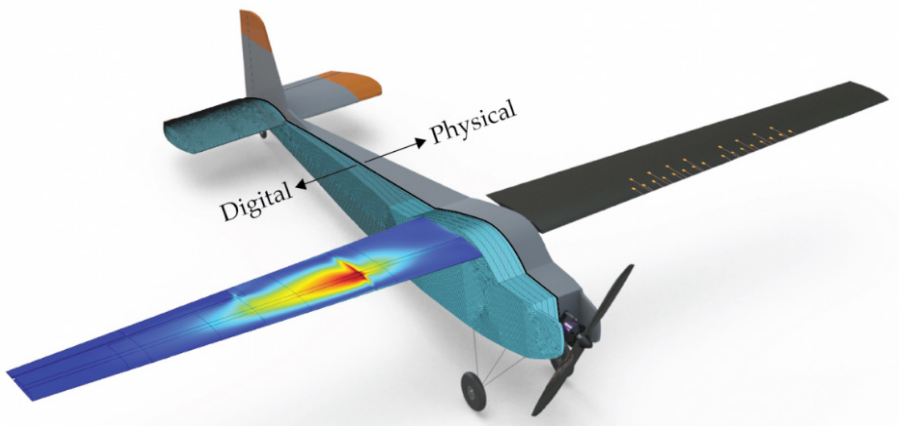
aerodinamik özelliklerine kadar geniş bir yelpazede veri toplama ve analiz yapmayı mümkün kılar. Örneğin, dijital ikizler aracılığıyla motor aşınması ve yakıt verimliliği gibi kritik performans göstergeleri izlenebilir ve optimize edilebilir.

Bakım ve Arıza Tahminleri: Dijital ikizler, bakım süreçlerini optimize etmek ve arıza tahminleri yapmak için kullanılır. Bu, uçakların arıza olasılıklarını öngörerek planlı bakım işlemlerinin zamanını belirlemede yardımcı olur. Özellikle, uçak bileşenlerinin kullanım ömürleri ve arızalar üzerindeki etkileri dijital ikizler aracılığıyla daha doğru bir şekilde tahmin edilebilir.

Tasarım ve Simülasyon: Dijital ikizler, tasarım aşamasında hava araçlarının performansını simüle etmek için kullanılır. Bu, mühendislerin yeni tasarımları fiziksel prototipler oluşturmadan önce sanal ortamda test etmelerini sağlar. Ayrıca, tasarım değişikliklerinin performans üzerindeki etkilerini değerlendirmeye olanak tanır, böylece daha iyi tasarım kararları alınabilir.

Operasyonel Verimlilik: Uçuş operasyonları sırasında dijital ikizler, uçakların performansını ve yakıt tüketimini izleyerek operasyonel verimliliği artırabilir. Bu, uçuş planlamasını ve gerçek zamanlı operasyonel kararları optimize etmede önemli bir rol oynar. Dijital ikizler, uçuş sırasında toplanan verileri analiz ederek, uçuş koşullarına göre en iyi performansı sağlamak için gerekli ayarlamaları yapabilir (Li ve diğ., 2021).

Eğitim ve Simülasyon: Dijital ikizler, pilot eğitimleri ve simülasyonları için de kullanılabilir. Uçuş simülatörlerinde kullanılan dijital ikizler, gerçek uçuş koşullarını ve senaryoları taklit ederek, pilotlara gerçek uçuş deneyimlerine benzer eğitim fırsatları sunar. Bu, eğitim süreçlerini daha etkili hale getirir ve pilotların kriz durumlarına hazırlıklı olmalarını sağlar.

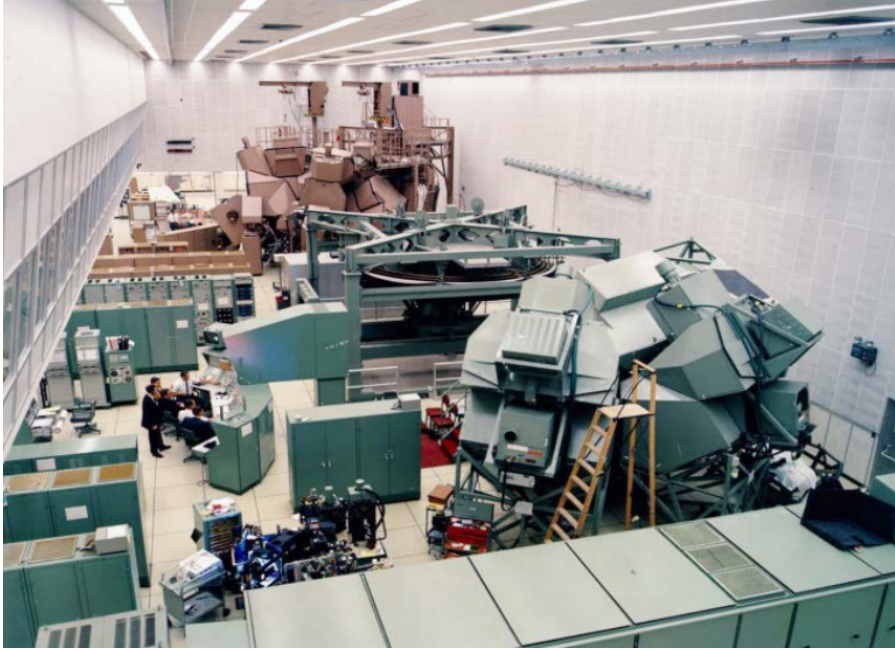


Şekil 3. Dijital İkiz ve Fiziksel Model (Advanced Technique for Developing Digital Twins Makes Tech Universally Applicable, 2021)

2.1 Havacılık Alanında Dijital İkiz

Havacılıkta Dijital İkiz'ler, uzay bilimi, güvenlik ve savunma, ticari uçaklar ve havacılık üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır; tasarımdan ürün teslimine kadar faaliyetleri kapsar (Li ve diğ., 2021). Bu dijital kopyalar, uçak yapılarının ömrünü tahmin etmek, yapısal bütünlüğü sağlamak ve uçağın operasyonel ömrü boyunca aşınma ve yorgunluğu analiz etmek için önemlidir (Tuegel, Ingrassia, Eason ve Spottswood, 2011). Ayrıca, Dijital İkiz'ler özellikle jet motorları gibi yüksek değerli ekipmanların analizinde kullanılarak önemli ölçüde maliyet tasarrufu ve güvenilirlik iyileştirmeleri sağlamaktadır (Khajavi, Motlagh, Jaribion, Werner ve Holmström, 2019).

İkiz kavramı ilk olarak NASA'nın Apollo 13 programı esnasında ortaya çıkmıştır. NASA bu program için en az iki uzay aracı oluşturarak dünyada farklı koşullarda bu aracı test etti ve ismini ikiz olarak tanımladı (Li ve diğ., 2022).



Şekil 4. Apollo 13 İkizi, Yeşil Bölüm Ana Modül, Kahverengi Bölüm Komuta Modülü, (Apollo Mission Simulators, 2024)

Diğer iyi bilinen donanım ikiz örneği de "Demir Kuş" (Iron Bird) denilen havacılık alanında uçağın hayati sistemlerini test ve optimize etmek için kullanılan araçlardır (Shafto ve diğ., 2010). Demir Kuş uçağın operasyon koşullarında karşılaşılabilecek yüklerin benzerlerini oluşturularak laboratuvar ortamında test edilmesini

sağlayan test düzeneğidir. Bu düzenek sayesinde birçok test yine fiziksel modeller üzerinde yapılmakta ve son ürünün şekillenmesi için avantaj sağlamaktadır.

İlk kez 2002 yılında Mihigan Üniversitesi'nden Profesör Michael Grives, sunumunda akıllı üretim ve geleceğin fabrikaları için idealize edilmiş bir yaşam döngüsü yönetimi yaklaşımı önerdi ve bunu Dijital İkiz olarak adlandırdı. Ancak bu kavramdan 2002 ile 2010 yılları arasında yapılan çalışmalarda çok nadir olarak bahsedildi. (Tao, Zhang, Liu ve Nee, 2019)

2010'ların başında, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Büyük Veri teknolojilerinin uygulanması ve endüstrileşmesi ile birlikte Dijital İkiz kullanımının pratikte hazır hale geldiği görüldü. Bu dönemde Nasa ve ABD Hava Kuvvetleri, havacılık alanında Dijital İkiz'lerin Ar-Ge'sine önemli katkılarda bulundular. (Li ve diğ., 2022).

Günümüzde simülasyon teknolojilerinin artan gücü ve Yüksek Başarımli Hesaplama (High Performance Computing, HPC) sistemlerinin kullanımı ile birçok test, gerçek model üzerinde alınan sonuçlara çok yakın sonuçlar vererek Dijital İkiz oluşturmamın önemini arttırmıştır. Bu testler ile tasarım ve üretim süreçleri kısalması; maliyetlerin de ciddi oranlarda azalmasını sağlamıştır.

Dijital dönüşüm sürecinde havacılık alanında her bir süreçte dijital modellerden farklı şekillerde faydalanmak mümkün hale gelmiştir. Ürünün fikir aşamasından tasarım üretim ve bakım sürecinde de farklı dijital modeller kullanılmaktadır bu modellerin her birini Dijital İkiz olarak nitelendirmemiz mümkündür. Bu nedenle Dijital İkiz kavramını tek bir model üzerinden anlatmak doğru bir yaklaşım olmayacaktır.

Bu çalışmada Dijital İkiz kavramı 3 başlık altında detaylandırılarak açıklanacaktır.

2.1.1 Tasarım Dijital İkizi:

Havacılık alanında Tasarım Dijital İkizi, konsept tasarım aşamasından üretim sürecine kadar olan süreçte farklı dijital modellerin entegrasyonunu ifade eder. Tasarım dijital ikizi, fiziksel bir hava aracının dijital bir temsili olarak işlev görür ve bu süreç boyunca çeşitli dijital modellerin bir araya gelmesini sağlar (Tao ve diğ., 2019). Bu kavram, hava aracının dış kabuk geometrisinin şekillendirilmesinden başlayarak, yapısal tasarımı ve sistem entegrasyonuna kadar geniş bir yelpazeyi kapsar.

İlk aşamada, hava aracının operasyonel gereksinimlerine göre dış kabuk geometrisi belirlenir. Bu süreçte, farklı görev koşullarına uygun olarak aerodinamik analizler gerçekleştirilir ve dış kabuk geometrisi optimize edilir. Bu analizler, hava aracının performansını ve verimliliğini artırmak için kritik öneme sahiptir. Aerodinamik performansı simüle etmek için kullanılan dijital modeller, hava akışını ve aerodinamik kuvvetleri değerlendirmede önemli bir rol oynar.

Dış kabuk geometrisinin yanı sıra, yapısal bütünlüğü sağlamak amacıyla üretilebilir yapısal tasarımlar oluşturulur. Bu aşamada, hava aracının üç boyutlu modelleri detaylı bir şekilde tasarlanır ve analiz edilir. Bu yapıların dijital temsilleri, fiziksel üretim öncesi testler ve değerlendirmeler için kullanılır (Jin ve diğ., 2020). Bu yapılar, dijital ikizin yapısal bileşenlerini oluşturur ve fiziksel prototiplerin gereksinimlerini azaltır.

Tasarım dijital ikizi, hava aracının tüm bileşenlerini içerecek şekilde genişletilebilir. Bu kapsamda, hava aracının sistemleri, kontrol mekanizmaları ve diğer fonksiyonel bileşenleri de dijital olarak modellenir. Sistem davranışlarını analiz etmek için kullanılan yazılımlar, bu modellerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için önemli bir araçtır. Böylece, tüm sistemler bir bütün olarak ele alınabilir ve sistem entegrasyonunda yaşanabilecek problemler önceden tespit edilebilir (Bollini, Rogers ve Tsuji, 2021).

Sonuç olarak, tasarım dijital ikizi kavramı, havacılık endüstrisinde fiziksel ve dijital sistemlerin entegrasyonunu sağlayarak, tasarım süreçlerini daha verimli ve güvenilir hale getirir.

2.1.2 Üretim Dijital İkizi:

Üretim dijital ikizi, ürünün üç boyutlu modelinden farklı olarak, üretim sürecini analiz etmek ve verimliliğini artırmak amacıyla kullanılan simülasyonlar ve dijital modellerden oluşur (Tao ve diğ., 2019). Üretim dijital ikizi, üretim hattının dijital bir kopyasını oluşturma yeteneği sunarak, üretim süreçlerinin optimize edilmesine ve verimliliğin artırılmasına olanak tanır. Bu kavram, üretim sürecinin dijital temsili üzerinden simülasyonlar yaparak, olası darboğazları ve verimlilik sorunlarını önceden tespit etme imkanı sağlar.

Üretim dijital ikizi ile üretim hatlarının dijital kopyaları oluşturulabilir. Bu dijital modeller, üretim süreçlerinin sanal ortamda simüle edilmesini sağlar ve böylece üretim hattında meydana gelebilecek sorunlar, darboğazlar ve verimsizlikler önceden belirlenebilir. Simülasyonlar, üretim hattının tüm aşamalarını analiz ederek, sürecin optimize edilmesine ve kaynak kullanımının verimli hale getirilmesine katkıda bulunur. Bu, üretim sürecinde gerçek zamanlı veri akışının ve performans analizlerinin entegrasyonunu içerir.

Günümüzde, üretim tezgahlarında kullanılan sensörler ve bu sensörlerden toplanan verilerin anlamlandırılması, dijital ve fiziksel verilerin entegrasyonunu mümkün kılmaktadır. Sensörler tarafından sağlanan gerçek zamanlı veriler, dijital ikizlerle birleştirilerek üretim sürecinin daha doğru bir şekilde izlenmesini ve kontrol edilmesini sağlar. Bu veri entegrasyonu, üretim sürecindeki anormalliklerin ve verimlilik düşüşlerinin hızlı bir şekilde tespit edilmesini ve düzeltilmesini sağlar (Lee, Bagheri ve Kao, 2022).

Dijital ikizler, üretim süreçlerinin sürekli olarak izlenmesine ve optimize edilmesine olanak tanır. Bu süreç, üretim sürecinin her aşamasını dijital olarak temsil ederek, üretim hatlarını ve süreçlerini daha verimli hale getirir. Ayrıca, üretim dijital ikizleri, bakım ve onarım süreçlerinin yönetilmesine, üretim hattının performansının artırılmasına ve genel üretim verimliliğinin yükseltilmesine önemli katkılarda bulunur (Brettel, Friederichsen, Keller ve Rosenberg, 2014).

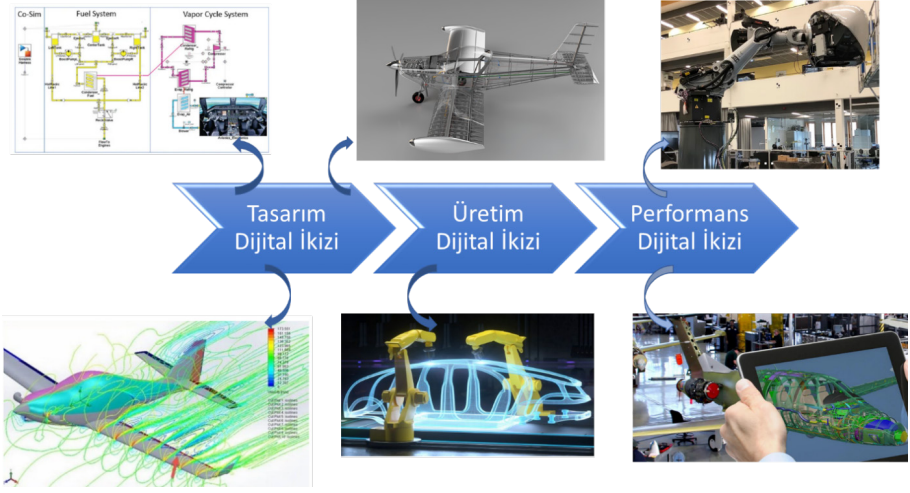
2.1.3 Performans Dijital İkizi:

Havacılık endüstrisinde, ürünlerin teslim edilmesinden sonra bakım, eğitim ve performans yönetimi gibi süreçler devam eder. Performans dijital ikizi, bu süreçlerde kritik bir rol oynar ve uçakların operasyonel performansını izleyerek bakım ve eğitim süreçlerini optimize etmek için kullanılır (Tao ve diğ., 2019).

Uçuş eğitimleri, genellikle simülatörler aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu simülatörler, gerçek uçuş koşullarını taklit ederek pilotlara çeşitli senaryoları deneyimleme fırsatı sunar. Simülatörler, dijital ikiz teknolojisi ile desteklenerek daha gerçekçi ve etkili eğitimler sağlanabilir. Performans dijital ikizi, simülatörlerin doğruluğunu ve pilot eğitimlerinin etkinliğini artırarak, pilotların acil durumlar ve çeşitli uçuş koşulları ile başa çıkabilme yeteneklerini geliştirir (Bollini ve diğ., 2021).

Bakım süreçlerinde ise, artırılmış gerçeklik (AR) ve dijital ikiz teknolojileri birlikte kullanılarak bakım işlemleri daha verimli hale getirilir. AR modelleri, bakım personeline gerçek zamanlı olarak gerekli bilgileri ve talimatları sağlayarak hataların önüne geçilmesine yardımcı olur. Performans dijital ikizi, bu modelleri destekleyerek bakım süreçlerinin doğru ve etkili bir şekilde yürütülmesini sağlar. Hava aracının kullanım esnasında da çeşitli sensörler ile elde edilen veriler anlamlandırılarak bakım süreçleri önceden belirlenebilir. Boeing firması 2 motorlu 737 uçağının motoru üzerine yerleştirdiği sensörler ile 6 saatlik uçuşta 300.000 parametre ile veri toplayarak her bir motor için saatte 20 terabayt veri elde etmiş ve bu veriyi anlamlandırarak bakım süreçlerini optimize etmeye çalışmıştır (Badea, Alin ve Boncea 2018). Bu tür bir veri analizi, performans dijital ikizinin bakım süreçlerinde proaktif bir yaklaşım benimsemesine ve bakım ihtiyaçlarının önceden tahmin edilmesine olanak tanır (Lee ve diğ., 2022).

Sonuç olarak, performans dijital ikizi, havacılık endüstrisinde bakım ve eğitim süreçlerinin optimize edilmesinde önemli bir araçtır. Eğitim simülatörleri ve AR modelleri ile entegre çalışarak, uçuş ve bakım süreçlerinde yüksek doğruluk ve verimlilik sağlar. Ayrıca, gerçek zamanlı veri analizi ile bakım süreçlerini daha etkin bir şekilde yönetmeye yardımcı olur.



Şekil 5. Farklı Dijital İkiz Modelleri (ASTRA Aerospace Design Engineering 2024; Digital Transformation Technology in Aerospace & Defense,2024; Using System Simulation to Manage Increasing Thermal Loads on Aircraft Fuel Systems, 2017)

Dijital İkiz, fiziksel bir varlığın dijital bir temsilidir ve bu temsil, fiziksel nesnenin yaşam döngüsü boyunca güncellenir ve entegre edilir. Dijital İkiz'in temel işlevi, ürün geliştirme sürecinde başlar ve ürünün işletim ve servis aşamalarında da devam eder. Yani, Dijital İkiz yalnızca ürünün davranışlarını tanımlamakla kalmaz, aynı zamanda bu davranışları optimize etmek ve performansını artırmak için kullanılabilir (Grieves, 2014). Dijital İkiz'in etkili bir şekilde çalışabilmesi için tüm sürecin entegre bir Dijital Örgü içerisinde bulunması gerekmektedir. Dijital Örgü, birden fazla dijital varlığın birbirleriyle ve fiziksel dünyayla etkileşim içinde olduğu bir yapı olarak tanımlanabilir. Bu yapı, ürün yaşam döngüsü boyunca verimliliği artırma ve performansı izleme konularında kritik öneme sahiptir (Tao ve diğ., 2019). Dijital İkiz'in tüm yaşam döngüsü boyunca verimli bir şekilde çalışması, bu entegrasyon sayesinde mümkün olur. Dijital Örgü'nün sağladığı bu bağlantı, sorunların kaynaklarını belirlemeyi ve gerekli düzenlemeleri yapmayı kolaylaştırır (Fuller, Fan, Day ve Barlow, 2020). Dijital Örgü'yü sağlamak için kullanılan yapılar arasında Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) sistemleri önemli bir rol oynar. PLM sistemleri, ürün bilgilerini, süreçlerini ve verilerini merkezi bir yerde toplar ve yönetir, bu da Dijital İkiz'in etkinliğini artırır. PLM sistemleri, ürün tasarımından üretime, servise kadar tüm aşamalarda verimliliği artırmak ve veri bütünlüğünü sağlamak için kullanılır. Dijital İkiz'in bu sistemlerle entegrasyonu, ürün verilerinin gerçek zamanlı olarak güncellenmesini ve optimize edilmesini mümkün kılar.

2.2 Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM)

Havacılık endüstrisi, yüksek güvenlik standartları, karmaşık mühendislik süreçleri ve sürekli yenilik gerektiren bir sektördür. Bu bağlamda, ürün yaşam döngüsü yönetimi (PLM) sistemleri, havacılık şirketleri için kritik bir rol oynamaktadır. PLM, bir ürünün tasarımı aşamasından emekli edilmesine kadar olan tüm yaşam döngüsünü kapsamlı bir şekilde yönetmeyi sağlayan entegre bir yaklaşımdır. Havacılık sektöründe PLM'in önemi, şu başlıca nedenlerle öne çıkmaktadır:

Gelişmiş Tasarım ve Mühendislik Yönetimi: Havacılık sektörü, karmaşık mühendislik bilgisi gerektiren tasarımlar ile karakterizedir. PLM sistemleri, mühendislik verilerini merkezi bir platformda toplar ve yönetir, böylece mühendislerin tasarım değişikliklerini kolayca izlemelerini ve koordine etmelerini sağlar. Bu, hataların en aza indirilmesine ve tasarım süreçlerinin daha verimli bir şekilde yürütülmesine olanak tanır.

Regülasyon ve Uyumluluk: Havacılık endüstrisi, sıkı regülasyonlara ve standartlara tabidir. PLM sistemleri, ürünlerin bu regülasyonlara uyumlu olarak geliştirildiğinden emin olmak için gerekli belgeleri, onayları ve test sonuçlarını merkezi bir veri havuzunda saklar. Bu, denetim süreçlerini kolaylaştırır ve uyumluluğun sürekliliğini sağlar. Özellikle, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) ve Federal Havacılık İdaresi (FAA) gibi kuruluşlar tarafından belirlenen standartların takip edilmesi PLM sistemleri ile daha etkili bir şekilde sağlanabilir.

Gelişmiş İş Birliği ve İletişim: Havacılık projeleri genellikle uluslararası çapta birden fazla paydaş ve tedarikçi içerir. PLM sistemleri, bu paydaşların tümüyle etkili bir şekilde iletişim kurmasını ve iş birliği yapmasını sağlar. Bu, projelerin zamanında tamamlanmasını ve kalite standartlarına uygunluğunu garanti eder. Merkezi bir PLM platformu, tüm paydaşların gerçek zamanlı veri ve proje güncellemelerine erişimini sağlar, bu da iş birliği süreçlerini iyileştirir.

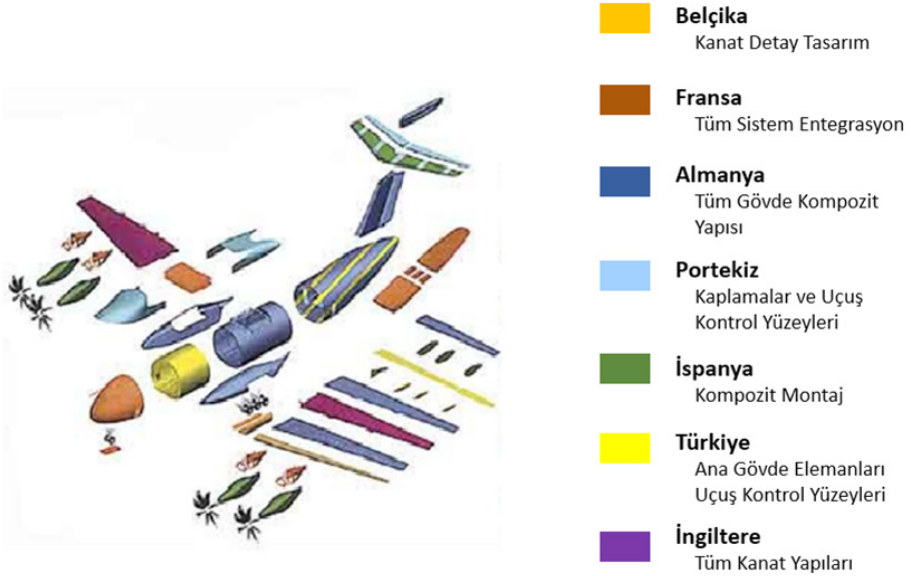
Veri Yönetimi ve İzlenebilirlik: Havacılık ürünleri genellikle uzun ömürlü ve karmaşık parçalardan oluşur. PLM sistemleri, ürün verilerini ayrıntılı bir şekilde takip ederek her bir parçanın geçmişini, bakım kayıtlarını ve değişiklikleri izlemeye olanak tanır. Bu, bakım süreçlerini ve parça değişimlerini optimize eder. Ayrıca, PLM sistemleri ürün izlenebilirliğini artırarak, herhangi bir sorun durumunda hızlı bir çözüm süreci sağlar.

Süreç Verimliliği ve İnovasyon: PLM, iş süreçlerini otomatikleştirir ve standartlaştırır, bu da zaman ve maliyet tasarrufu sağlar. Ayrıca, yenilikçi tasarım fikirlerinin daha hızlı bir şekilde hayata geçirilmesini destekler. Havacılık şirketleri, bu verimlilik artışı sayesinde rekabet avantajı elde eder. PLM sistemlerinin entegrasyonu, üretim sürecindeki her aşamada iyileştirmeler sağlayarak, inovasyonu teşvik eder ve piyasaya hızlı bir şekilde yeni ürün sunma yeteneğini artırır.

Müşteri Memnuniyeti ve Güvenilirlik: PLM sistemleri, müşteri geri bildirimlerini ve performans verilerini toplar, böylece ürünlerin müşteri ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde sürekli olarak iyileştirilmesini sağlar. Bu, müşteri memnuniyetini artırır ve markanın güvenilirliğini pekiştirir. Müşteri geri bildirimleri ile ürün geliştirme süreçlerinin entegre edilmesi, müşteri beklentilerinin daha iyi karşılanmasını sağlar.

Havacılık sektöründe PLM sistemlerinin entegrasyonu, sadece operasyonel verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda sektördeki güvenlik ve kalite standartlarının karşılanmasına yardımcı olur. Bu nedenle, havacılık şirketleri için PLM sistemlerinin stratejik bir yatırım olduğu söylenebilir.

Ürün tasarımı ve geliştirme sürecinde PLM büyük bir rol oynamaktadır. PLM, tüm sürecin dijitalleştirilmesine ve verimliliğin artmasına yardımcı olur. Ürün tasarımında PLM, tasarımcılara ve mühendislere bir çözüm sunarak iş birliği yapmalarını ve tasarım verilerini paylaşmalarını sağlar. Şekil 6. da görüldüğü gibi Airbus A400M projesinde farklı yapıların farklı ülkelerde tasarlanması ve üretilmesi, tüm sürecin uyum içinde olması PLM sistemlerinin kullanımı sayesinde olmuştur. Ayrıca, PLM ile tasarımda yapılan değişiklikler tüm iş sürecine yansıtılır ve bu da hata oranını minimize eder.



Şekil 6. AirBus A400M Projesi için Çalışan Ülkeler (Mas, Menéndez, Oliva ve Ríos, 2013)

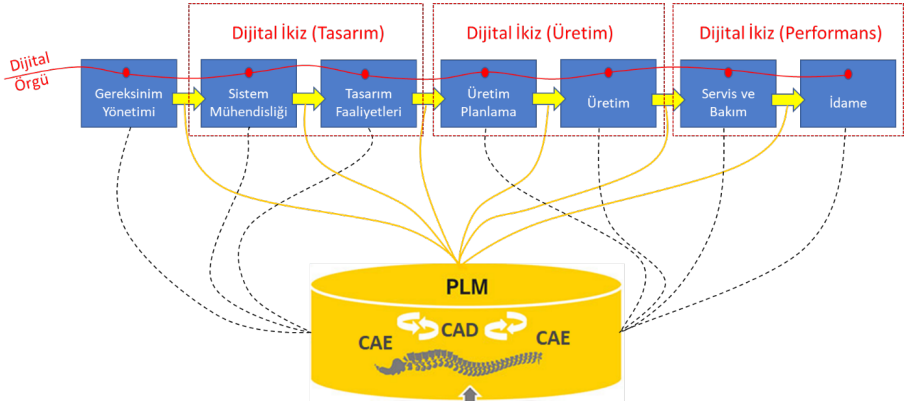
3. Tartışma

PLM, modern endüstrinin karmaşık ve dinamik doğasında ürün geliştirme süreçlerini yönetmek için kritik bir araçtır. Bu süreçler arasındaki bağlantıların önemi, ürün yaşam döngüsünün her aşamasında verimliliği, kaliteyi ve yenilikçiliği artırmak için hayati öneme sahiptir. PLM, süreçler arasındaki bağlantıları sağlayarak tüm paydaşların aynı veriye erişimini kolaylaştırır ve karar alma süreçlerini hızlandırır. Böylece, tasarım değişiklikleri, üretim güncellemeleri veya hizmet talepleri gibi herhangi bir değişiklik hızla diğer süreçlere iletilerek uygun şekilde yönetilebilir.

PLM süreçlerinde, modellerden ve dijital veriden oldukça fazla miktarda yararlanır. Ürünün dijital kopyası, süreçlerin dijital ortamda simüle edilmesini, süreçlerdeki problemlerin önceden belirlenmesini; PLM sistemlerinin sağladığı Dijital Örgü sayesinde de problemin kaynağına erişimi kolaylaştırmaktadır. Dijital İkiz, PLM süreçlerinin her aşamasında kullanılmaktadır ancak tüm süreç içerisindeki Dijital İkiz'i tek bir kavram üzerinden ifade etmek doğru olmayacaktır. Dijital İkiz kavramını daha iyi anlayabilmek için tüm süreçlerde fiziksel ürünün davranışlarını yansıtan yapıların hepsini Dijital İkiz olarak değerlendirmemiz gerekecektir.

Ürünün fikir aşamasından üretime kadar olan süreçte kullanılan 3B modeller Tasarım Dijital İkizi olarak, üretim süreçlerini simüle eden dijital fabrika simülasyonları Üretim Dijital İkiz'i Olarak, ürünün müşteriye tesliminden sonra bakım faaliyetlerini ve operasyon süreçlerini simüle eden veriler de ürünün Performans Dijital İkiz'ini oluşturur. Bu üç Dijital İkiz türü, PLM aracılığıyla birbirleriyle bağlantılı bir şekilde yönetilir ve Şekil 7'de gösterildiği gibi, tüm bu süreçlerin takibi ve entegrasyonu sağlanır. Bu entegrasyon, verilerin PLM ortamında tek bir noktada depolanmasını mümkün kılar, böylece bilgi akışı daha düzenli ve erişilebilir hale gelir

PLM ve Dijital İkiz ayrı ayrı da birçok fayda sağlasa da birlikte yönetildiğinde çok daha verimli bir ürün yönetimi oluşturmaktadır. Dijital İkizler, PLM sistemlerinin sunduğu veri ve süreç yönetimini destekleyerek, ürün yaşam döngüsü boyunca daha iyi kararlar alınmasını ve süreçlerin daha verimli bir şekilde yürütülmesini sağlar. Bu nedenle, PLM ve Dijital İkizlerin entegrasyonu, modern endüstriyel uygulamalarda ürün yönetimini optimize etmek için güçlü bir araçtır.



Şekil 7. PLM süreçleri ve Dijital İkiz Bağlantısı (The backbone of the digital twin, 2018)

4. Sonuç

Bu çalışma, havacılık endüstrisinde Dijital İkiz'lerin önemini ve bu Dijital İkiz'lerin Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) sistemleri üzerindeki kritik rolünü vurgulamaktadır. Bu çalışma Dijital İkiz kavramına farklı bir bakış açısı getirerek tek bir Dijital İkiz kavramı yerine üç farklı alanda Tasarım, Üretim ve Ürün teslimi sonrası kullanılan dijital modeller üzerinden değerlendirmiştir. Ayrıca bu çalışma tüm bu Dijital İkiz modellerinde verilerin PLM platformunda oluşturulmasının ve verinin ortak bir sistemde toplanmasının önemini ortaya koymaktadır. PLM sistemlerinin Dijital İkiz'lerle bütünleşmesinin, şirketlerin ürünlerinin yaşam döngüsü boyunca daha hızlı ve güvenilir bilgilere erişmelerini, daha hızlı kararlar almalarını ve süreçlerini daha etkili bir şekilde yönetmelerini sağladığı konusunu vurgulamıştır. Bu entegrasyonun sonucunda, şirketlerin rekabet avantajlarını artırdığı ürün kalitesi ve müşteri memnuniyetini artırma potansiyeli bulunduğu ayrıca vurgulanmıştır.

Kaynakça

Advanced Technique for Developing Digital Twins Makes Tech Universally Applicable, (2021), <https://news.utexas.edu/2021/05/20/advanced-technique-for-developing-digital-twins-makes-tech-universally-applicable/>

Apollo Mission Simulators (2024), Erişim Adresi: https://apollo11space.com/apollo-mission-simulators-computer-control-companys-ddp-224/#Apollo_Mission_Simulators

Bal, A., Gevrek, H., & Demir, S. (2022). Kitleleşmiş İmalat Sistemlerinde Dijital İkiz Kullanılarak Gerçek Zamanlı Üretim Çizelgeleme ve Tekstil Sektöründe Bir

Uygulama. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 34(2), 328-336. Doi: <https://doi.org/10.7240/jeps.1068970>

Badea, Victor & Alin, Zamfiroiu & Boncea, Radu. (2018). Big Data in the Aerospace Industry. *Informatica Economica*. 22. 17-24. Doi: <https://doi.org/10.12948/issn14531305/22.1.2018.02>.

Bollini, P., Rogers, D., & Tsuji, N. (2021). Integration of Digital Twin and Advanced Simulation Techniques in Aerospace Systems. *Aerospace Science and Technology*, 109, 106460. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106460>

Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). *How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective*. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 8(1), 37-44. Doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1336426>

Digital Transformation Technology in Aerospace & Defense | Siemens Software, (2024), Erişim Adresi: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/fr/webinar/digital-transformation-strategies/82533>

Expertise | ASTRA Aerospace Design Engineering | South Africa, (2024), Erişim Adresi: <https://www.astraero.com/expertise>

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). "Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research." *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 380-395. Erişim Adresi: <https://arxiv.org/pdf/1911.01276v3>

Grieves, M. (2014). "Digital Twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication." *IMEchE*, 1-12. Erişim Adresi: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication

Khajavi, S.H., Motlagh, N.H., Jaribion, A., Werner, L.C., & Holmström, J. (2019). Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings. *IEEE Access*, 7, 147406-147419. Doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515>.

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2022). A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, 28, 28-32. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>

Li, L., Aslam, S., Wileman, A., & Perinpanayagam, S. (2021). Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction *IEEE Access : Practical Innovations, Open Solutions*, 10, 9543-9562. Doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3136458>.

Mercimek A. F. & Geçkil, T. (2021). Endüstri 4.0'ın lojistik sektörüne uygulanması:

- Lojistik 4.0, Five Zero, 1(1), 57-77. Doi: <https://doi.org/10.54486/fivezero.2021.5>.
- Mete, M. H. (2023). Dijital Oyunların Geleceğinde Metaverse Etkisi. *TRT Akademi*, 8(17), 294-317. Doi: <https://doi.org/10.37679/trta.1198870>
- Mas F, Menéndez J.L., Oliva M., Ríos J. (2013), Collaborative Engineering: An Airbus Case Study, *Procedia Engineering*, Volume 63, Pages 336-345, ISSN 1877-7058. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.180>.
- Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J., & Wang, L. (2010). Draft modeling, simulation, information technology & processing roadmap. *Technology area*, 11, 1-32. Erişim Adresi: https://www.researchgate.net/publication/280310295_Modeling_Simulation_Information_Technology_and_Processing_Roadmap
- Tao, Fei & Zhang, He & Liu, Ang & Nee, Andrew. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. vol. 15, no. 4, pp. 2405-2415, April 2019, Doi: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.
- The backbone of the digital twin (2018 <https://www.harting.com/US/en/topics/backbone-digital-twin>).
- Tuegel, E.J., Ingraffea, A.R., Eason, T., & Spottswood, M. (2011). Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2011, 154798, Doi: <https://doi.org/10.1155/2011/154798>, 2011.
- Using System Simulation to Manage Increasing Thermal Loads on Aircraft Fuel Systems - *Mobility Engineering Technology*, (2017). Erişim Adresi: <https://www.mobilityengineeringtech.com/component/content/article/27377-using-system-simulation-to-manage-increasing-thermal-loads-on-aircraft-fuel-systems>